



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA
13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

CATEGORIA 3

INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL PARA OTIMIZAÇÃO DA MANUTENÇÃO DE PSDs

INTRODUÇÃO

As Portas de Plataforma (PSD, do inglês *Platform Screen Doors*) constituem uma barreira física entre a plataforma e a via, instaladas em sistemas metroferroviários para elevar a segurança dos usuários, impedir intrusão na via, preservar a via de objetos e melhorar as condições ambientais da plataforma (Roh et al., 2010). Por serem um ativo diretamente ligado à segurança e à disponibilidade da operação, exige-se delas um número reduzido de falhas e,



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

sobretudo, a menor incidência possível de intervenções corretivas durante o período comercial.

A prática consolidada de manutenção desses ativos apoia-se em dois pilares: rotinas preventivas de calendário e monitoramento por limiares — alarmes disparados quando uma grandeza (corrente, tempo de manobra, peso) ultrapassa um valor fixo. Trabalhos anteriores apresentados neste fórum já demonstraram que a corrente do motor reflete a força necessária à movimentação da porta, abrindo caminho para o monitoramento contínuo da saúde do equipamento (artigo “[referência omitida para preservar o anonimato]”, 30ª STMF). Este trabalho dá o passo seguinte: transformar esse histórico de telemetria, somado aos registros corporativos de manutenção, em decisão priorizada — uma lista que indica, ranking atualizado diariamente e empregado na programação semanal, quais portas a equipe deve inspecionar primeiro.

A motivação é econômica e operacional. A mão de obra especializada e as janelas de manutenção não comercial são recursos escassos: cada inspeção mobiliza uma equipe, ferramental e deslocamento noturno entre estações. Direcionar esse esforço para as portas de maior risco — em vez de distribuí-lo uniformemente ou reagir a alarmes — multiplica o retorno da manutenção. O objetivo deste trabalho é apresentar uma solução de manutenção preditiva baseada em aprendizado de máquina que produz um ranking de prioridade de inspeção das PSDs, consolidando em uma única plataforma informações antes dispersas entre o sistema corporativo de ordens de manutenção (ERP), os logs de monitoramento de diferentes fabricantes e as métricas de aquisição de dados de campo.



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

As contribuições são: (i) a fusão de fontes historicamente isoladas em um repositório analítico único, com comparação de cada porta ao comportamento de sua própria fachada; (ii) uma formulação do problema como priorização por risco relativo — e não como classificação binária ou limiar de alarme — adequada ao desbalanceamento de classes; (iii) a avaliação com dados futuros modelando o fator de ganho em relação ao acaso (*Lift*) e taxa de captura de positivos (*Recall*) aplicados estritamente aos percentis de maior escore de probabilidade com divisão de bases cronológica que impede o vazamento de dados (*data leakage*) e (iv) a validação de campo do ranking, com achados físicos confirmados pela equipe de manutenção.

Mais do que um modelo preditivo, o trabalho propõe uma mudança de processo e de cultura: uma manutenção centrada no ser humano (na acepção da Indústria 5.0), em que a inteligência artificial aumenta a capacidade da equipe — priorizando inspeções, esclarecendo procedimentos e liberando o técnico do trabalho de digitação — sem jamais substituir o seu julgamento. O restante do artigo está organizado assim: a Seção Diagnóstico caracteriza o problema, os dados e os desafios metodológicos; a Seção Análise dos Resultados descreve o método, apresenta a avaliação, casos de uso reais e a mudança de paradigma; a última Seção conclui e aponta trabalhos futuros.



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

A Tabela abaixo delimita a relação de continuidade e a contribuição inédita deste trabalho em relação ao anterior.

Tabela 1- Delimitação de escopo entre trabalhos. Fonte: autoria própria.

Dimensão	Trabalho da 30ª STMF	Trabalho atual
Questão central	A corrente representa a força?	Quais portas inspecionar primeiro?
Dados	Curvas de corrente e força medida	Telemetria, logs e ERP integrados
Escala	Ensaio e estações instrumentadas	Centenas de portas e histórico operacional
Método	Correlação e regressão física	Estatística de recorrência e aprendizado de máquina
Resultado	Monitoramento contínuo viável	Ranking de prioridade de manutenção
Validação	Bancada e instrumento calibrado	Dados futuros e inspeção em campo



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

DIAGNÓSTICO

O problema: onde estão as falhas

A análise do histórico corporativo de manutenções corretivas revela um padrão determinante: as falhas concentram-se fortemente em poucas portas. Ordenando-se as PSDs da mais problemática para a menos, o quinto superior (20%) acumula cerca de metade das corretivas, e as portas crônicas (com três ou mais corretivas no período) concentram a maior parte das ordens de manutenção. Trata-se de uma manifestação clara do princípio de Pareto na manutenção.

Esse achado desloca o enquadramento do problema. Um ativo que falha, é reparado e volta a operar não é bem descrito pela teoria clássica de tempo-até-a-falha (própria de itens não-reparáveis); é um sistema reparável, cuja métrica natural é o número acumulado de recorrências ao longo do tempo — a Função Cumulativa Média (Ascher & Feingold, 1984;



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

Nelson, 2003). A consequência de projeto é direta: a priorização deve ser adaptativa à intensidade recente de falhas de cada porta, e não uma lista fixa.

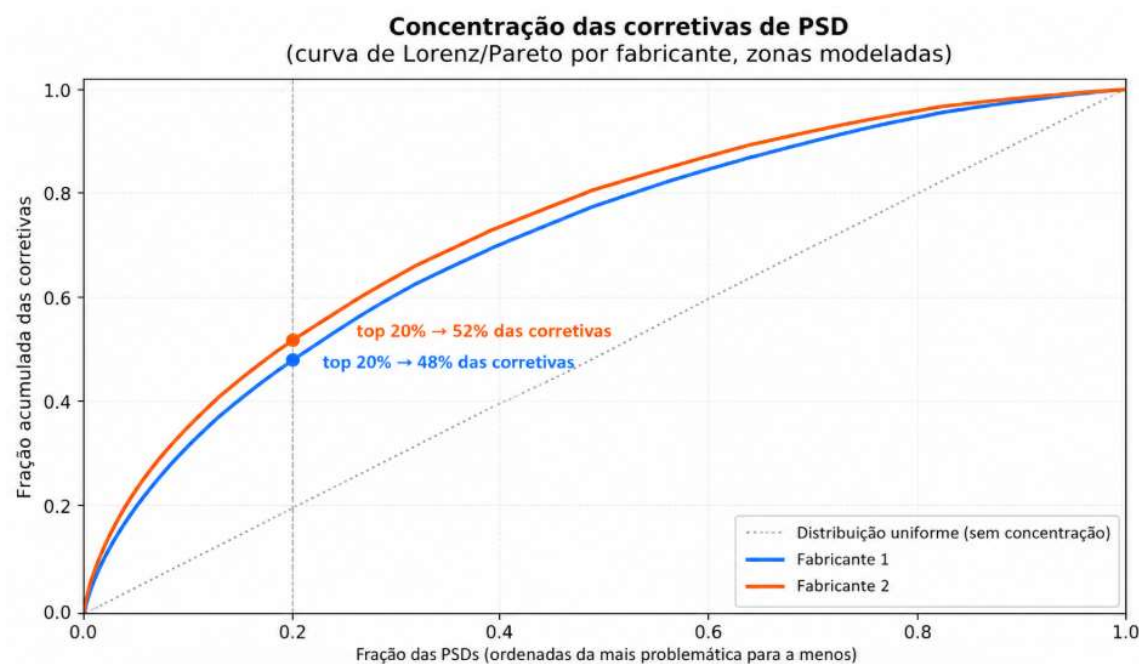


Figura 1 — Concentração das corretivas (curva de Lorenz/Pareto por fabricante). O topo concentra parcela desproporcional das ordens de manutenção. Fonte: Autoria própria.

Dados e arquitetura

A solução integra três fontes com naturezas e cadências distintas: (a) o ERP de manutenção, de onde provêm as ordens corretivas confirmadas —fonte mais valiosa usada como verdade de referência (alvo); (b) a telemetria de aquisição de dados de campo, que registra, a cada ciclo, grandezas como corrente e temperatura; e (c) os logs do controlador de porta (Figura 2), que emitem códigos discretos de estado e falha. As duas últimas são empregadas como atributos.



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS



Figura 2 — Módulo de Controle de Porta (MCP): emite os códigos de estado/falha registrados nos logs do Pannel de Comando Centralizado (PCC). Fonte: Autoria própria

Os dados percorrem uma organização em camadas progressivas de refino (entrada bruta → limpeza → junção → validação/enriquecimento → homologação) sobre um armazenamento distribuído de objetos, sendo consultados por um banco de dados colunar, otimizado para agregações analíticas. A modelagem, o retreinamento periódico e o painel operacional consomem a camada homologada.

Na origem da cadeia de telemetria está um conjunto de aquisição desenvolvido internamente e apresentado em trabalho anterior deste fórum ([referência omitida para preservar o anonimato], 30ª STMF): um sensor de corrente não intrusivo, que converte a corrente contínua do motor (−20 A a +20 A) para o padrão industrial de 4–20 mA com resposta linear validada em bancada, e o MDL (*Metrô Data Logger*) — um coletor de dados modular baseado



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários

ANP
TRILHOS
TIC TRENS

32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

em processador ARM, com entradas analógicas e digitais, filtragem anti-ruído embarcada e múltiplos protocolos de comunicação, validado em campo contra instrumento calibrado.

O MDL opera como dispositivo de computação de borda (*edge computing*): em vez de transmitir a forma de onda completa de cada ciclo — milhares de amostras de cada porta saturariam a rede e o armazenamento —, ele processa o sinal onde ele nasce e publica apenas descritores compactos por ciclo: corrente de pico, corrente de arrasto (a que melhor espelha a força de movimento), corrente de manutenção, tempos de abertura e fechamento e peso estimado da porta. Os benefícios acompanham a literatura de *Edge AI* para manutenção preditiva (Sipola et al., 2023): redução drástica de banda e armazenamento — o que tornou sustentável acumular dezenas de milhões de ciclos com baixa latência, escalabilidade e resiliência a intermitências de rede, com custo marginal muito baixo por extrair inteligência de telemetria já existente. A figura 3 apresenta uma visão geral da arquitetura.

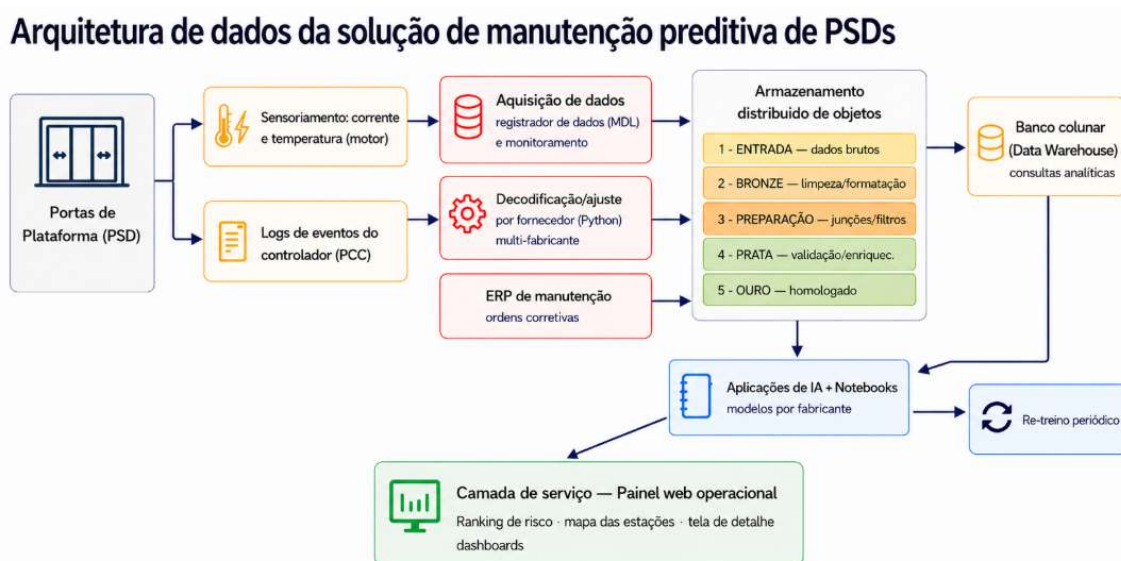


Figura 3 — Arquitetura de dados da solução. Fonte: Autoria própria.



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

Desafios metodológicos

1. **Fadiga de alarme do limiar fixo.** Um limiar único gera fluxo contínuo de alertas; em eventos raros, obter alta precisão é muito mais difícil do que manter baixa taxa de falso-positivo. Daí a opção por ordenar por risco em vez de sentenciar falha.
2. **Fabricantes diferentes.** As PSDs de fabricantes distintos possuem características incompatíveis entre si; os modelos são treinados separadamente por fabricante e com base em similaridade;
3. **Estações com diferentes períodos de dados de acordo com a instalação e instrumentação.** Essa heterogeneidade torna a comparação direta entre ativos menos confiável, pois equipamentos com histórico mais curto podem aparentar menor incidência de falhas apenas por terem sido observados por menos tempo, enquanto equipamentos com maior massa histórica tendem a concentrar mais registros.
4. **Desbalanceamento relevante.** A maior parte das ocorrências concentra-se em poucas portas crônicas. Além disso, nem toda intervenção real gera ordem corretiva — componentes são substituídos em preventivas, demandando cuidado no registro das atividades.
5. **Silos de Dados.** O primeiro grande obstáculo é a fragmentação das informações. Muitas vezes, os dados de operação (como abertura e fechamento de portas), os registros de manutenção (ordens de serviço preenchidas manualmente por técnicos) e as informações de engenharia (manuais e fabricantes) residem em sistemas



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA **13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS**

completamente diferentes e isolados. Unificar essas bases exige um esforço massivo de integração de sistemas.

Fenomenologia física

A confiança da equipe depende de os sinais serem interpretáveis à luz da PDM (Porta Deslizante Motorizada), que é a principal estrutura da PSD. Boa parte dos sinais estão relacionados à transmissão (correia dentada, polia e trolley, no interior do header box — Figura 4): desvios de tensão da correia e folga na polia/chaveta alteram a força de movimentação e, portanto, a assinatura de corrente e o tempo de fechamento;

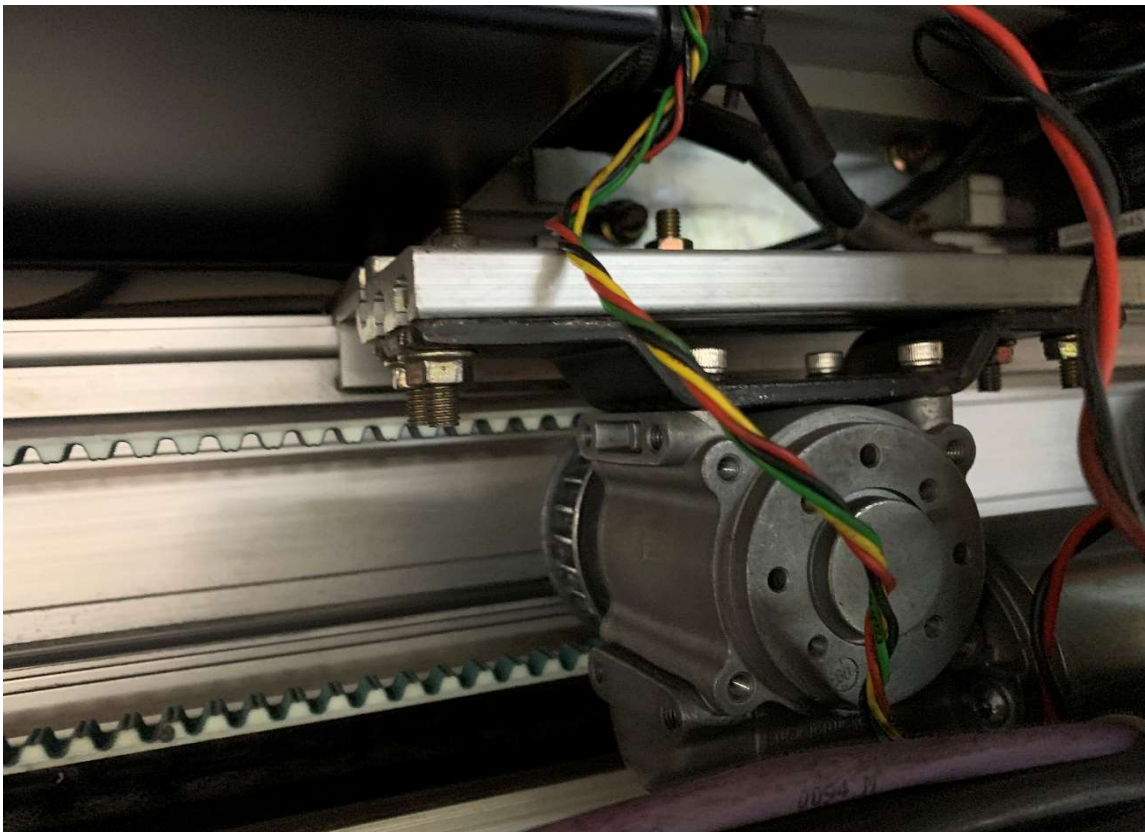


Figura 4 — Interior do header box: correia dentada, trolley e polia. Fonte: Autoria própria.



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

A figura 5 apresenta um gráfico do sistema que traz como grandeza o peso da porta e permite visualizar detalhes de uma PDM a partir do ranking. A linha azul é a PDM que apresenta o equipamento escolhido com desvio relevante, a linha lilás é a porta com melhor desempenho da fachada e a linha tracejada é a mediana da grandeza de todas as portas da fachada para comparações. Na parte inferior e superior do gráfico vemos os limiares de atenção e desastre caso ultrapassados. Ao longo do gráfico temos linhas verticais que podem representar corretivas, preventivas e preditivas que fornecem informações resumidas sobre cada ponto do gráfico.

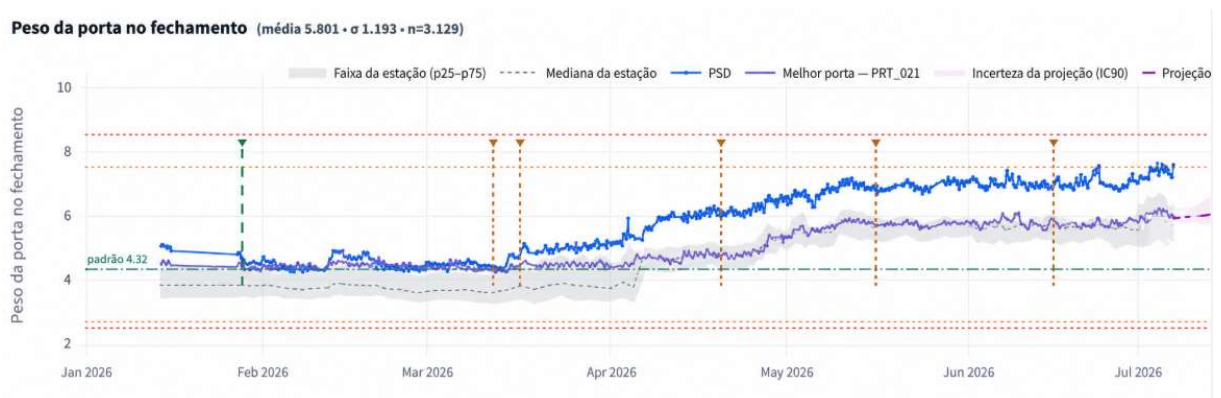


Figura 5 — Comparação do peso da porta com a melhor porta e mediana de todas as portas da fachada. Fonte: Sistema Preditivo de Manutenção

Os logs são fundamentais para manutenção preditiva porque registram eventos que antecedem uma quebra, permitindo que algoritmos identifiquem padrões e calculem a intensidade recente de falhas em sistemas reparáveis. Essa riqueza de dados sequenciais e



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

carimbados no tempo permite estimar o risco de ocorrência de corretiva com a antecedência necessária (*lead time*) para a ação das equipes, transformando dados brutos em indicações de risco priorizadas e evitando paradas inesperadas na operação. A figura 6 mostra como até mesmo os eventos de operação normal apresentam indícios de falha antes de uma manutenção corretiva.

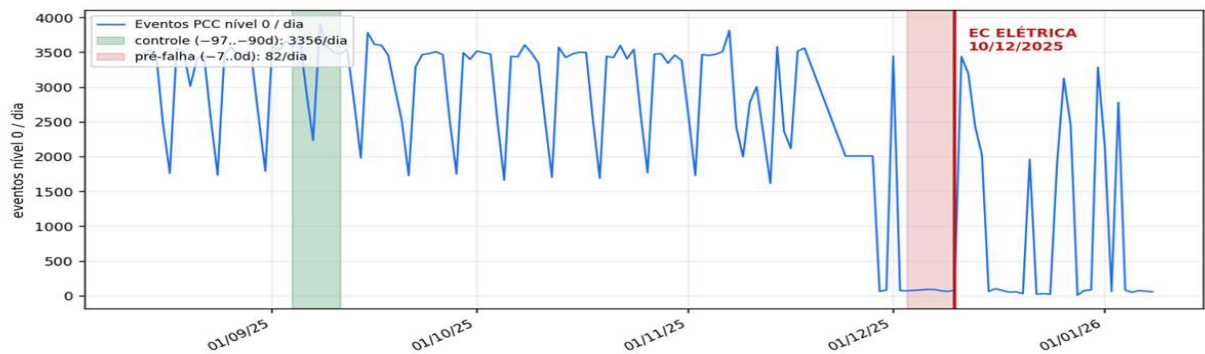


Figura 6 - Logs de operação de uma PDM relacionados a todo o processo de abertura e fechamento. Fonte: PCC

ANÁLISE DOS RESULTADOS

Método

A solução fornece uma atualização diária de PDMs com diversas informações e posição em um ranking de risco. O escore que ordena a fila é uma combinação entre um ranking estatístico que abrange ocorrências de todo tipo que impactam a operação e um ranking mais focado no aprendizado de máquina abrangendo falhas relacionadas a PDM. O componente estatístico resume a recorrência recente de corretivas (robusto, sem treino, imune a sobreajuste). O componente de aprendizado de máquina é um modelo de árvores por gradiente (LightGBM



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

— Ke et al., 2017), treinado separadamente por fabricante e horizonte, que incorpora atributos de telemetria — peso, tempos de abertura/fechamento, corrente de pico — e valores derivados: divergência em relação à mediana da fachada e volatilidade do regime nos últimos 30 dias. A explicação por atributo de cada porta (valores de Shapley — Lundberg & Lee, 2017) é exibida no painel operacional, sustentando a interpretabilidade.

Todo o processo obedece a um protocolo único de validação temporal: janela deslizante com 10 dobras e intervalo de segurança (gap) de quatro semanas entre treino e teste, com previsões fora-da-amostra agrupadas. A tabela 2 resume o protocolo experimental.

Tabela 2 – Protocolo experimental e método. Fonte: Autoria própria.

Item	Especificação
Unidade de previsão	Porta-dia, consolidada em ranking com atualização diária
Alvo	Ocorrência de ao menos uma corretiva do recorte endereçável nos 28 dias seguintes à data de referência
Janela retrospectiva	Atributos de telemetria e logs em janelas de 7, 14 e 30 dias, além de recência e intensidade de corretivas
Amostra	528 portas em 11 estações (dois fabricantes), com períodos de instrumentação distintos por estação
Dados ausentes	Sinalizados com indicadores explícitos de ausência antes de qualquer imputação



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

Fusão dos escores	Combinação ponderada de percentis (estatístico e LightGBM), com peso do aprendizado de máquina governado por fabricante e monitorado em backtest
Validação	Janela deslizante com 10 dobras e intervalo de segurança de 4 semanas; nunca divisão aleatória
Seleção do modelo	AUPRC e lift@top10% em predições fora-da-amostra
Benchmarks	Ranking por recorrência histórica (piso estatístico) e seleção aleatória; o modelo só é promovido se superar o piso

Métricas

Reporta-se a AUC-ROC por comparabilidade com a literatura, mas ela é secundária neste trabalho devido ao desbalanceamento (Davis & Goadrich, 2006). As métricas primárias são a AUPRC — comparada à taxa-base — e o *lift* no topo da fila, com o recall no topo.

Tabela 3 - Desempenho por fabricante (walk-forward 10-fold, gap=4, horizonte 4 semanas).

Fonte: Autoria própria

Modelo	Taxa-base	AUC-ROC	AUPRC	Lift@top10%	Recall@top10%
Por porta — Fabricante 1	16,8%	0,62	0,262	2,07×	0,214



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

Por porta — Fabricante 2	13,2%	0,65	0,227	2,38×	0,242
Por fachada — Fabricante 2 ¹	57,5%	0,79	0,818	1,65×	0,236

Primeiro, no nível por porta a AUPRC (0,23–0,26) é 1,6 a 1,7 vez a taxa-base, e o lift@top10% de 2,1–2,4× significa que a fila mais que dobra a densidade de corretivas no topo. Em segundo lugar, o sinal de fachada (a via inteira como unidade) é forte: AUC 0,79 e AUPRC 0,82, superando o baseline. O nível de fachada não é reportado para o Fabricante 1 por insuficiência de dados sistêmicos para ranqueamento - menos de 13% dos eventos registrados em relação ao fabricante 2. No nível de fachada, o recall@top10% é contabilizado por corretiva (evento) e agregado entre as dobras; como as fachadas do topo concentram múltiplas corretivas, o valor pode exceder o teto nominal de uma leitura binária por unidade ($10\% \div 57,5\% \approx 17,4\%$).

Validação de campo: do ranking à plataforma

O valor prático ficou evidente quando a equipe passou a consultar o ranking para orientar inspeções. A Tabela 4 confronta intervenções de portas em Vila Matilde na Linha 3 com que a equipe encontrou em campo.

¹ Nota: AUC-ROC e AUPRC no nível de fachada são calculadas sobre observações fachada-dia. O recall@top10% é ponderado pelo número de eventos corretivos e agregado entre as dobras temporais.



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

Tabela 4 — Ranking × histórico de ocorrências × achado de campo (Linha 3, Estação Vila Matilde, jul/2026). Fonte: Autoria própria.

Porta	Posição	Ocorrências / Métricas MDL / ERP	Programação	Achado de campo
056	13	conjunto motor (3), sensor fech. (3), trava (2), MCP (2)	SEM PREVENTIVA PROGRAMADA	correia com baixa tensão, motor com ruído, desgaste na polia e rasgo na chaveta, base do trolley entortada
015	4	correia dentada (1), sensor fech. (3)	preventiva programada	correia com tensão abaixo do desejado
027	7	módulo de portas (3), sensor (3), MCP (1)	preventiva programada	anéis o'ring desgastados, base de trolley entortada
016	17	MCP / controlador eletrônico (9), correia (2), sensor (2)	preventiva programada	sem desvio mecânico encontrado

1. **A porta 056 é o caso emblemático.** Ela não tinha preventiva programada, mas apareceu no topo do ranking; a inspeção dirigida encontrou diversos desvios na transmissão — A inspeção revelou degradações na cadeia de transmissão coerentes com parte do histórico de manutenção e com os sinais que elevaram o risco da porta.e variabilidade



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA **13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS**

nos dados de monitoramento de porta como peso e corrente de pico. O sistema priorizou a porta para inspeção e a equipe encontrou degradações mecânicas coerentes com o histórico e com os sinais que elevaram seu risco. A Figura 7 apresenta que apresenta uma foto da polia - um dos componentes identificados com anomalia.



Figura 7 – Polia do motor, responsável pela interface entre o motor e a correia.

Fonte: Autoria própria.

- 2. As portas 015 e 027 confirmam a leitura física.** Na 015, as três fontes apresentaram evidências convergentes de degradação mecânica: o modelo elevou o risco da porta, o histórico registrava ocorrência recente relacionada à correia e a inspeção confirmou tensão abaixo do desejado. A equipe encontrou desgaste de *o'rings* e *trolley* entortado, evidência de que o desgaste mecânico prossegue e é captado pela deterioração das métricas. Na figura 8 abaixo temos o uso do dinamômetro para medir o peso da porta,



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

que é uma das atividades do plano de manutenção. Essa medição também serve para avaliar em situações pontuais nos sensores de monitoramento.



Figura 8 – Dinamômetro Digital e o Peso da Porta. Fonte: Autoria própria.

3. **A porta 016 é um caso interessante.** Apontada em posição elevada, não apresentou desvio mecânico. Seu histórico é dominado por falhas do controlador eletrônico (MCP), modo de falha fora do escopo do modelo de corrente. Contudo, a elevação decorre das métricas derivadas, e essa capacidade passou a ser usada para priorizar portas para calibração de sensores e detecção de desvios de offset das curvas — um segundo uso operacional.
4. **O ciclo se fecha com um trabalho em equipe dos técnicos, equipe de monitoramento e engenharia.** Os relatórios de campo ricos em conjunto com os dados e inferências validadas retroalimentam os estudos e as conversas sobre como ajustar o modelo e reorganizar o plano de manutenção.



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

Predição, Análise, Projeções e Avaliação da Intervenção

O ranking faz projeções sobre quando grandezas de monitoramento podem chegar em limiares de maior risco, degradações e emergências, conforme as figuras 9 e 10.

L02_SAC_PSD_PRT_035	L02	SAC	4 grandezas degradando
L03_VTD_PSD_PRT_011	L03	VTD	● Normal
L02_TTI_PSD_PRT_054	L02	TTI	★ pico → Atenção ≈ 24/08 (43d)

Figura 9 – Ranking de PDMs. Estação Sacomã com 4 grandezas degradando e Tamanduateí com projeção do peso da porta entrar em nível de atenção em 43 dias. Fonte: Extraído do sistema.

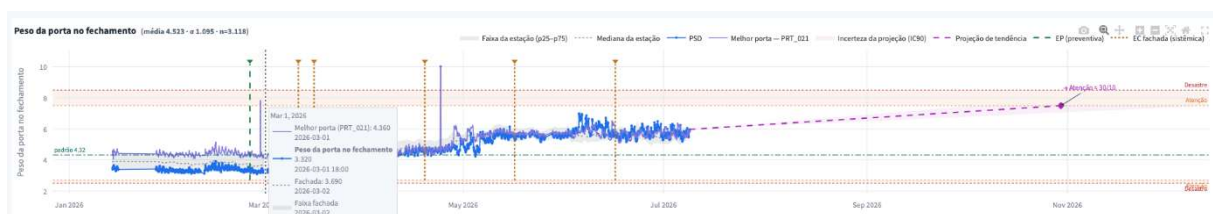


Figura 10 - Gráfico da projeção do peso da porta entrar em nível de atenção em 43 dias.

Projeção em linha tracejada lilás. Fonte: Extraído do sistema.

O sistema permite avaliar diversas métricas em diferentes janelas de tempo (figura 11).



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

Métrica	Antes	Depois
Peso porta	8.22 ⚠	5.24 ✓
Corrente pico fech. (A)	6.45 🛑	4.87 ✓
Corrente arrasto fech. (A)	1.96 ✓	1.31 ✓
Corrente manut. fech. (A)	1.86 ✓	1.89 ✓
Tempo fech. (s)	3.65 ✓	3.59 ✓
Assinatura fech. (%)	62.00 ✓	61.00 ✓
Corrente pico abert. (A)	-6.35 ⚠	-4.62 ✓
Corrente manut. aberta (A)	-1.55 ✓	-1.52 ✓
Tempo abert. (s)	3.65 ✓	3.57 ✓
Assinatura abert. (%)	75.00 ✓	80.00 ✓

Estado vs faixa normal: ✓ na faixa · ⚠ atenção · 🛑 desastre · — sem dados. Efeito: ● aproximou do padrão ·

Figura 11 – Comparação de Métricas de Monitoramento antes e depois da Intervenção.

Fonte: Extraído do Sistema.

Diferenciais, aplicabilidade e limitações

Destacam-se: (i) escala e realismo — centenas de portas, fabricantes com características distintas, histórico e dados variáveis à medida que novas estações com PSDs são monitoradas; (ii) validação temporal fora da amostra; (iii) enquadramento do problema como priorização em sistema reparável; (iv) centralização de dados do ERP, telemetria e logs com comparação por fachada; (v) uso com validações em campo; e (vi) arquitetura de custo marginal muito baixo, que extrai inteligência da telemetria já existente com arquitetura local ou *on-premises*, com perspectiva de maior escala e uso de modelos mais avançados com investimentos no novo Parque de IA.



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

Entre as limitações estão a heterogeneidade dos períodos de instrumentação, a possível ausência de registros com informações específicas de determinadas intervenções realizadas, heterogeneidade entre fabricantes, a quantidade ainda restrita de inspeções prospectivas em campo e a possibilidade de deriva do comportamento das portas após alterações de firmware, sensores, manutenção ou substituição de componentes. Os resultados demonstram capacidade de priorização, mas ainda não estabelecem causalidade nem precisão de diagnóstico por modo de falha. Há diversas iniciativas em curso para mitigar esses problemas.

Estimativa de ganho e otimização de mão de obra

Esta seção traduz as métricas de desempenho apresentadas no artigo técnico — em especial o $\text{recall@top10\%}$ de 21% a 24% (Tabela 3) e o $\text{lift@top10\%}$ de 2,1× a 2,4× (Tabela 3) — em duas leituras práticas: horas de mão de obra e valor financeiro.

Todos os parâmetros usados aqui ou saem da base analítica do próprio sistema ou são herdados de levantamento interno de referência (custo-hora de R\$ 292,12).



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

Ressalva essencial: por que é uma estimativa

Conforme discutido na Seção 2.3 (desafio metodológico 3), as plataformas foram instrumentadas gradativamente, resultando em períodos de monitoramento distintos por estação. Assim, estações com histórico recente aparentam menor incidência de falhas apenas devido ao menor tempo de observação, enquanto aquelas com maior tempo de operação concentram mais registros. Além disso, nem toda intervenção real gera uma ordem corretiva (censura do rótulo, Seção 2.3, item 4). Por esses motivos — e por dependerem de variáveis contratuais sujeitas a recalibração —, todos os valores apresentados a seguir devem ser interpretados como estimativas de ordem de grandeza, e não como resultados contábeis.

A base de 2025

Em todo o ano de 2025, as 11 estações em processo de monitoramento por esse sistema específico (4 do fabricante 1: VTD, TTI, SAC, VPT; 7 do fabricante 2: JAB, TUC, ART, VPA, PEN, CAR, BEL — 48 portas cada) registraram 1.786 ordens de manutenção corretiva (EC):

Tabela 5 — Manutenções corretivas registradas por estação no parque monitorado em 2025. Fonte: autoria própria.

Estação	ECs 2025	Estação	ECs 2025
VTD	234	TTI	165
ART	215	PEN	136
VPA	212	TUC	131
SAC	207	BEL	126
CAR	187	VPT	92



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

—	—	JAB	81
Total			1.786

Dessas 1.786 ordens, 876 (49%) constituem o recorte endereçável pelo sistema: a união entre as ordens com família mecânica identificada no texto (motor, correia, polia, trolley, trava e módulo de porta — 251 ordens) e as ordens com diagnóstico de classe A (727 ordens), com interseção de 102. Os dois critérios são complementares — cada um cobre o ponto cego de registro do outro —, e a união é o recorte prudente quando o falso negativo (falha não antecipada em operação) custa mais que o falso positivo (uma inspeção adicional). Foram excluídas as ordens canceladas e as demais famílias (sensores, cabos, painéis e software), fora do alcance do sinal físico monitorado. Aplicando a essa base o recall@top10% de 21,4% a 24,2% (Tabela 3), obtêm-se de 187 a 212 corretivas potencialmente sinalizadas antes da ocorrência por ano.

Mão de Obra

Um atendimento corretivo emergencial mobiliza tipicamente 2 horas-técnico por evento (parâmetro do levantamento interno de referência): deslocamento, diagnóstico sob pressão e medida de contorno, frequentemente com retrabalho posterior. Aplicando às 187–212 corretivas como eventos potencialmente sinalizados antes da ocorrência: aproximadamente 375 a 424 horas-técnico liberadas por ano. O ponto central (~400 h-téc) equivale a cerca de



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

dois meses de um técnico em jornada integral deslocados do "apagar incêndio" para a manutenção planejada de qualidade.

Há ainda o efeito de realocação. Guiadas pelo ranking, as mesmas intervenções encontram 2,1 a 2,4 vezes mais portas em risco por hora trabalhada (lift@top10%, Tabela 3).

Perspectiva Financeira

Com o custo-hora técnico de R\$ 292,12 (levantamento interno de referência):

Piso (recall 21,4%)	$187,5 \times 2 \times \text{R\$ } 292,12$	$\approx \text{R\$ } 109,5 \text{ mil}$
Teto (recall 24,2%)	$212,0 \times 2 \times \text{R\$ } 292,12$	$\approx \text{R\$ } 123,9 \text{ mil}$
Ponto central	$199,7 \times 2 \times \text{R\$ } 292,12$	$\approx \text{R\$ } 116,7 \text{ mil}$

Este valor é o piso do benefício, pois remunera apenas a hora técnica direta. Como referência de literatura do setor — não específica de PSDs —, o custo total de um reparo emergencial — logística noturna, indisponibilidade, dano secundário — é 4 a 5 vezes o de uma intervenção planejada no mesmo ativo, com retorno típico de programas preditivos da ordem de 10:1 (US DOE, 2010, cap. 5); a McKinsey (2017) estima redução de 18–25% nos custos de manutenção e de 30–50% na indisponibilidade, com estimativas semelhantes em Deloitte (2017). Aplicando o diferencial emergencial-planejado sobre o custo total evitado, a economia plena tende a 3–4 vezes a economia direta — ordem de R\$ 330 a 495 mil/ano para o parque monitorado.



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

Próximos Passos

Três movimentos em andamento devem elevar tanto o recall quanto a precisão do sistema — e, com eles, todas as linhas do quadro acima.

1. Parque de IA. Há um investimento em andamento em um Parque de IA que ampliará a capacidade computacional disponível para o projeto. Isso viabiliza o uso de modelos mais avançados de *Deep Learning* (redes convolucionais 1D e arquiteturas sequenciais sobre os sinais brutos de corrente, em vez de apenas atributos agregados por ciclo) e o retreinamento mais frequente sobre a população completa — mantendo, como estabelece o artigo, a governança que só promove o modelo quando ele supera o piso estatístico em *backtest*.

2. Corrente + encoder (posição contínua). Já está em estudo o monitoramento da corrente em conjunto com o *encoder* da porta. A lógica física é simples: a corrente diz quanto esforço o motor fez; a posição diz onde no percurso esse esforço ocorreu. Com o *encoder*, cada ciclo pode ser segmentado em aceleração, velocidade constante e desaceleração, e a corrente pode ser comparada ponto a ponto no domínio do deslocamento (0% a 100% do curso) — o que distingue, por exemplo, um pico de partida normal de um atrito localizado no meio do trilho. A literatura de portas ferroviárias sustenta o ganho: Ham et al. (2019), em bancada com corrente e *encoder*, elevaram a acurácia de diagnóstico; Kang et al. (2022) confirmaram o valor da representação no domínio do deslocamento; e Zhou et al. (2024) mostraram que a fusão de corrente, movimento e vibração reduz falsos alarmes em falhas incipientes. Esses percentuais são de bancadas controladas — não constituem promessa de acurácia em campo — , mas indicam a direção do maior ganho incremental disponível.



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

3. Testes A/B de rotulagem (em andamento). Estão em andamento testes A/B para rotular melhor as falhas: fluxos alternativos de registros são comparados quanto à completude e à qualidade do rótulo gerado. Em conjunto, os movimentos atacam todas as pontas do funil: o *Deep Learning* sobre sinais mais ricos tende a elevar a fração antecipável, a incorporação dos dados de *encoder* tende a melhorar a precisão do diagnóstico — aumentando a confiança da equipe —, e os testes A/B de rotulagem aumentam a própria base de verdade com que o sistema aprende e é medido.

A mudança de paradigma: manutenção aumentada e centrada no humano

O resultado mais duradouro deste trabalho não é um ou mais modelos de *Machine Learning*, e sim uma mudança de paradigma na cultura de manutenção. Representa mais um estágio de uma jornada na transição para um regime cada vez mais preditivo e prescritivo, orientado a dados e priorizado por risco. A literatura de ativos é enfática ao apontar que essa transição é, antes de tudo, organizacional: evoluir da manutenção reativa para a proativa exige, antes de tudo, os dados, as ferramentas e as pessoas certas; e a mudança de cultura — a disposição de confiar em um novo instrumento — é fator crítico de sucesso, mais do que a técnica em si.

O arranjo adere ao princípio central da Indústria 5.0, cujos pilares são a centralidade no ser humano, a resiliência e a sustentabilidade: em vez de substituir o trabalho humano, a inteligência artificial o amplia, cabendo à máquina o processamento de dados e a detecção de padrões, e ao profissional o julgamento, a experiência e a decisão (Xu et al., 2021). O papel do empregado não é eliminado — é elevado para o estrategista de manutenção preditiva. É por isso que, no sistema, a equipe sempre valida a indicação do modelo: a



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

priorização dirige o esforço, mas não dispensa o especialista. A porta 015 (Tabela 4) ilustra bem essa concordância virtuosa: o modelo a elevou no ranking a partir de indicadores derivados da telemetria, o histórico registrava uma corretiva recente de correia dentada, e a inspeção em campo confirmou correia com tensão abaixo do desejado — três evidências independentes (modelo, histórico e observação humana) apontando para o mesmo componente. O modelo não decidiu sozinho: ele direcionou o olhar do técnico, que verificou e confirmou. É o humano no circuito (*Human-in-the-loop - HITL*) funcionando como projetado.

Um problema crônico e caro da manutenção é a qualidade dos dados de ordens de serviço: organizações perdem cifras expressivas por ano com dados ruins, no conhecido efeito “entra-lixo, sai-lixo”. A causa é conhecida: a documentação é a primeira vítima quando o técnico está sob pressão de tempo, e o descompasso entre o local onde o trabalho acontece e o terminal onde é registrado degrada a qualidade e corrói a produtividade. O sistema ataca a raiz ao centralizar e automatizar atividades usando dados operacionais.

Em resumo, o valor do trabalho está tanto no pipeline — a fusão de fontes, o banco analítico e os modelos — quanto na filosofia de uso que ele materializa: uma manutenção aumentada, em que a inteligência artificial complementa o especialista, pede confirmação antes de registrar, expõe a origem de suas conclusões e devolve ao profissional o tempo antes gasto em tarefas administrativas. É a diferença entre automatizar a manutenção e potencializar as pessoas.



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA **13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS**

CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma solução de manutenção preditiva para PSDs que converte telemetria já existente, logs e registros corporativos de manutenção em decisão operacional: um ranking de prioridade de intervenções, por porta, usando aprendizado de máquina. O enquadramento do problema — sistema reparável, priorização por risco relativo e árvores de decisão (crescimento por folha) em vez de classificação binária por limiar fixo — mostrou-se decisivo diante da concentração das falhas em portas crônicas.

Os resultados sustentam a proposta. Sob validação temporal estrita, o decil superior do ranking concentra de 2,1 a 2,4 vezes mais corretivas que o acaso, e a inspeção de apenas 10% do parque captura de 21% a 24% das corretivas das quatro semanas seguintes. A validação de campo confirmou o valor prático: portas apontadas pelo ranking apresentaram desvios físicos coerentes com o histórico — incluindo uma das portas sem preventiva programada cuja inspeção dirigida revelou desvios na transmissão —, e a fenomenologia dos sinais (recuperação das métricas após manutenção, silêncio precursor, trava engripando) dá lastro físico às previsões. O ganho econômico decorre sobretudo da eficiência alocativa: aplicar a mesma hora de manutenção onde ela tem maior probabilidade de evitar uma falha em serviço, convertendo corretivas emergenciais em intervenções planejadas.

Por fim, o sucesso no desenvolvimento e na validação prática deste modelo só foi possível graças ao apoio contínuo de todas as equipes e colaboradores da gerência de manutenção. A



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

abertura para os testes de campo, o compartilhamento de conhecimento técnico e o empenho na execução das manutenções preditivas foram fundamentais para transformar dados em valor operacional. Expressamos nosso sincero agradecimento a todos que contribuíram para consolidar a manutenção preditiva como um pilar de eficiência e segurança em nossa operação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASCHER, H.; FEINGOLD, H. Repairable systems reliability: modeling, inference, misconceptions and their causes. New York: Marcel Dekker, 1984.

DAVIS, J.; GOADRIC, M. The relationship between Precision-Recall and ROC curves. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MACHINE LEARNING, 23., 2006, Pittsburgh. Proceedings. New York: ACM, 2006. p. 233–240.

DELOITTE. Predictive maintenance: taking pro-active measures based on advanced data analytics to predict and avoid machine failure. Munique: Deloitte Analytics Institute, 2017.

[referência omitida para preservar o anonimato]. In: SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA, 30., 2024, São Paulo. Trabalhos técnicos. São Paulo: AEAMESP, 2024.

HAM, S. et al. A comparative study of fault diagnosis for train door system: traditional versus deep learning approaches. Sensors, v. 19, n. 23, art. 5160, 2019. DOI: 10.3390/s19235160.



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

KANG, G. H. et al. A genetic algorithm and PCA-based feature selection to improve the failure diagnosis performance of railway vehicle doors. IEEE Access, v. 10, p. 115787–115801, 2022.

DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3216885.

KE, G. et al. LightGBM: a highly efficient gradient boosting decision tree. In: ADVANCES IN NEURAL INFORMATION PROCESSING SYSTEMS, 30., 2017, Long Beach. Proceedings. Red Hook: Curran Associates, 2017. p. 3146–3154.

LUNDBERG, S. M.; LEE, S.-I. A unified approach to interpreting model predictions. In: ADVANCES IN NEURAL INFORMATION PROCESSING SYSTEMS, 30., 2017, Long Beach. Proceedings. Red Hook: Curran Associates, 2017. p. 4765–4774.

MCKINSEY & COMPANY. Smartening up with Artificial Intelligence (AI): what's in it for Germany and its industrial sector? Frankfurt: McKinsey & Company, 2017.

NELSON, W. B. Recurrent events data analysis for product repairs, disease recurrences, and other applications. Philadelphia: SIAM, 2003.

ROH, J. S.; RYOU, H. S.; YOON, S. W. The effect of PSD on life safety in subway station fire. Journal of Mechanical Science and Technology, v. 24, p. 937–942, 2010.

SIPOLA, T. et al. A comprehensive review and a taxonomy of edge machine learning: requirements, paradigms, and techniques. AI, v. 4, n. 3, p. 729–786, 2023.

UNITED STATES. Department of Energy. Operations & maintenance best practices: a guide to achieving operational efficiency. Release 3.0. Washington, DC: Federal Energy Management Program, 2010.



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

XU, X. et al. Industry 4.0 and Industry 5.0 — inception, conception and perception. Journal of Manufacturing Systems, v. 61, p. 530–535, 2021.

ZHOU, K. et al. An information fusion based incipient fault diagnosis method for railway vehicle door system. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, v. 9, n. 1, p. 1320–1332, 2024. DOI: 10.1109/TIV.2023.3331709.