



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA
13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS
CATEGORIA 3

DIAGNÓSTICO AUTOMATIZADO DE RÁDIOS DE DADOS: ANÁLISE
MULTICAMADA E MONITORAMENTO PREDITIVO

INTRODUÇÃO

A MRS Logística administra uma malha ferroviária de aproximadamente 1.643 km, distribuída pelos estados de Minas Gerais, Rio de Janeiro e São Paulo, região responsável por cerca de metade do PIB brasileiro (MRS LOGÍSTICA, 2014). A operação segura e produtiva dessa malha apoia-se em sistemas eletroeletrônicos de telecomunicação, dentre os quais se destaca o CBTC. Nesse sistema, a comunicação entre o Centro de Controle Operacional (CCO), os ativos de campo e o computador de bordo da locomotiva transmite continuamente as informações necessárias para licenciar cada movimento, monitorar trens à frente, respeitar restrições de velocidade e acionar freios preventivos quando algo foge dos limites de segurança (JUNIOR,



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários

ANP
TRILHOS
TIC TRENS

32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

2021). O elo físico que sustenta esse fluxo na malha da MRS é o Rádio de Dados. Distribuídos por toda a extensão da via, esses equipamentos operam em arquitetura TDMA (*Time Division Multiple Access*) e se dividem em dois tipos: *Control Points* (CPs), com fibra óptica e conexão direta ao servidor; e Intermediários (INTs), que atuam como repetidores e se comunicam com os CPs por radiofrequência. Quando um único rádio falha, o efeito não fica restrito a ele: trens que circulam sob sua cobertura podem ser parados instantaneamente pelo CBTC, como medida de segurança.

Diante desse cenário, duas perguntas operacionais passaram a guiar um trabalho de desenvolvimento interno no Centro de Diagnóstico de Confiabilidade (CDC). A primeira é reativa: depois que um incidente ocorre, como diagnosticar com rapidez e precisão o que aconteceu, a partir de logs de comunicação com milhares de linhas? A segunda é preditiva: como identificar, em tempo útil, quais rádios já apresentam sinais de degradação em seu módulo de GPS, e atuar sobre eles antes que afetem a circulação de trens (AUTOR, 2022)? Ambas as perguntas reproduzem, no contexto dos Rádios de Dados, as três etapas clássicas de um programa de manutenção baseada na condição, a aquisição dos dados, o seu processamento e a tomada de decisão de manutenção (JARDINE; LIN; BANJEVIC, 2006).

Este artigo apresenta duas ferramentas desenvolvidas internamente para responder a essas perguntas: um analisador automatizado de logs de comunicação, que substitui a leitura manual pós-incidente; e um sistema autônomo de coleta de *Event Logs* via *Telnet*, que torna visíveis os alarmes internos de GPS hoje confinados ao próprio rádio. Em conjunto, as duas ferramentas marcam a transição da manutenção desses ativos de um modelo



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

majoritariamente corretivo para um modelo preditivo, premissa central das estratégias de manutenção baseadas na condição do ativo (MOBLEY, 2002) e alinhada às melhores práticas da função estratégica de manutenção (KARDEC; NASCIF, 2012).

Fundamentação técnica

O Sistema de Controle de Trens Baseado em Comunicação (CBTC)

O CBTC ou Controle de Trens Baseado em Comunicação, representa uma evolução disruptiva na sinalização e no controle ferroviário. Trata-se de um sistema automático e contínuo que utiliza a determinação em alta resolução da localização de um comboio de forma independente dos tradicionais circuitos de via (JUNIOR, 2021). A arquitetura CBTC fundamenta-se na comunicação contínua e de alta capacidade de dados entre o trem e a via, contando com processadores distribuídos em ambos os lados capazes de implementar as funcionalidades de proteção, controle e supervisão, conjunto este denominado *Automatic Train Control* (ATC). Essa tecnologia permite conhecer a posição exata de cada composição na linha com precisão, viabilizando uma gestão de tráfego consideravelmente mais segura, flexível e eficiente.



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



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

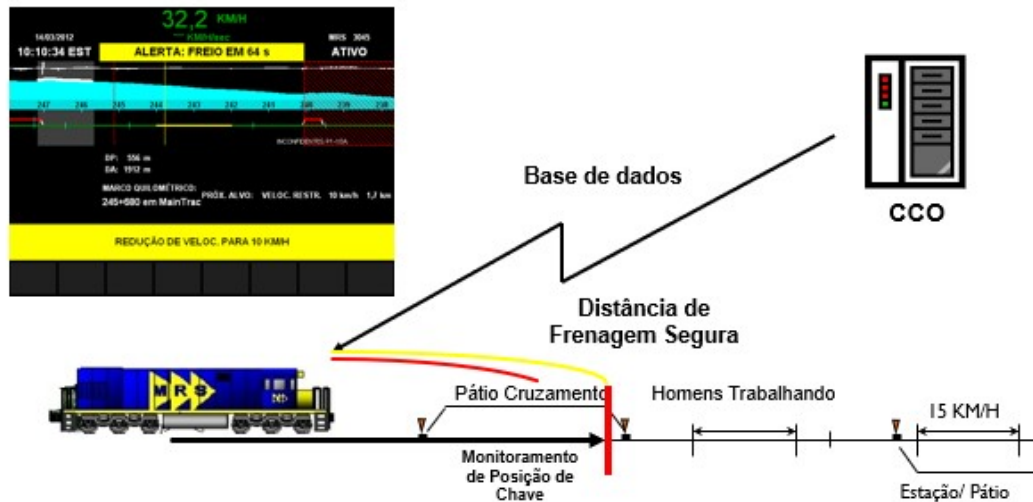


Figura 1 – Visão geral do sistema de bordo do CBTC. Fonte: Workshop Telecomunicação Rádio de Dados 256 MHz, 2022.

A segurança operacional desse deslocamento baseia-se no cálculo dinâmico da autoridade de movimento e do perfil de frenagem do trem, estabelecendo limites operacionais definidos por uma distância de alerta e uma distância de frenagem segura, conforme ilustrado na Figura 1. O avanço da composição depende do processamento de diversos parâmetros operacionais intrínsecos ao sistema CBTC, bem como do recebimento ininterrupto de informações dos ativos instalados no trecho à frente. Caso o sistema embarcado deixe de receber as atualizações de um dispositivo que se encontre dentro da sua distância de alerta, o computador de bordo aciona uma contagem regressiva e exige do maquinista a redução imediata da velocidade até que a visibilidade dos dados seja restabelecida. No entanto, se a falha de comunicação persistir e a zona "cega" invadir a distância de parada, o CBTC aplica



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

penalidade, acionando os freios de forma compulsória para imobilizar o trem antes do limite de segurança.

Infraestrutura de Rádios de Dados e arquitetura de comunicação

Esta camada física e de conectividade que sustenta o ecossistema CBTC é composta essencialmente pelos Rádios de Dados. A rede baseia-se em equipamentos transceptores digitais de alta confiabilidade, a exemplo do modelo GE MDS TD 256, que operam em uma faixa dedicada de 256 MHz totalmente integrada aos sistemas vitais de campo (GE MDS, 2018). Essa infraestrutura divide-se de forma hierárquica e estratégica entre *Control Points* (CPs) e rádios Intermediários (AUTOR, 2022). Embora ambas as categorias de rádio realizem a transmissão final para o trem via radiofrequência (RF), a distinção fundamental reside na interface de comunicação com os servidores centrais. Os CPs atuam como nós mestres, conectados diretamente ao *backbone* de fibra óptica para injetar na rede as diretrizes geradas pelo Centro de Controle Operacional (CCO).



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários

ANP
TRILHOS
TIC TRENS

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

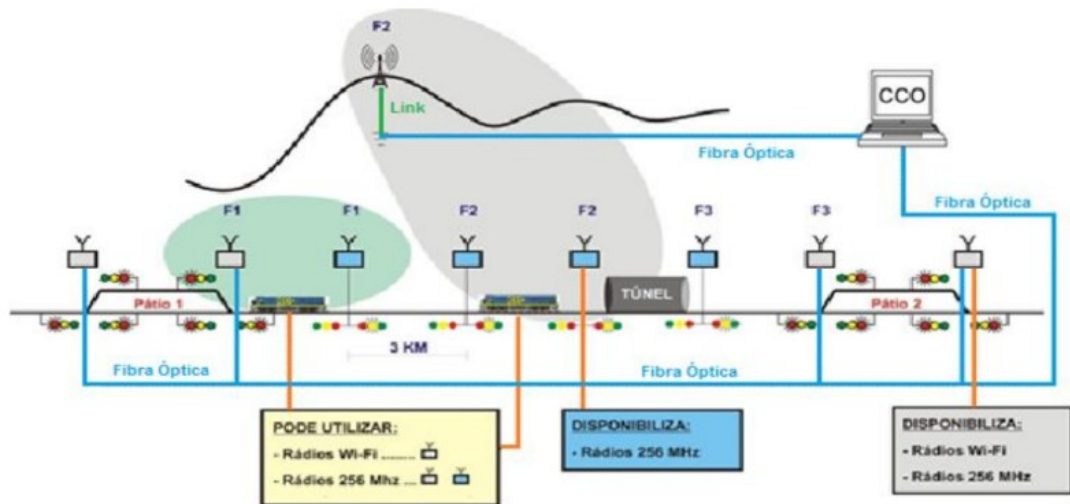


Figura 2 – Visão geral da comunicação dos Rádios de Dados. Fonte: Workshop Telecomunicação Rádio de Dados 256 MHz, 2022.

Por sua vez, os rádios Intermediários operam como repetidores para estender a cobertura em regiões remotas ou de topografia complexa. Desse modo, quando uma locomotiva está conectada a um rádio Intermediário, os comandos enviados pelo CCO trafegam por fibra óptica até o CP correspondente; a partir dali, o CP transmite a informação via RF para o rádio Intermediário, que se encarrega de retransmiti-la até o trem (Figura 2).

Para o compartilhamento dessa frequência única sem colisões de pacotes, os ativos utilizam o protocolo TDMA, método que gerencia o canal dividindo-o em janelas temporais (*slots*) de milissegundos exclusivos para a transmissão de cada equipamento (GODDARD, 2006). Sob o princípio de segurança intrínseca (*fail-safe*), qualquer interrupção crônica nesse enlace de comunicação impede a renovação do licenciamento de circulação. Como consequência direta,



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



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

o sistema é forçado a atuar, aplicando o freio de serviço no trem e imobilizando o comboio de forma compulsória, evento que penaliza os indicadores de Trens Hora Parado (THP).

Sinalização ferroviária e as Mensagens de Status de Via (WSM)

Dentre as diversas mensagens que trafegam pelas janelas temporais desse protocolo TDMA, as WSMs (*Wayside Status Messages* ou Mensagens de Status de Via) possuem papel de destaque na camada de aplicação. A WSM constitui um tipo de mensagem vital para a sinalização, encarregada de descrever, em tempo real, a condição física e operacional dos ativos instalados ao longo da via. Como cada localidade possui um arranjo específico de chaves, sinais e outros dispositivos de campo, cada ponto geográfico gera as suas próprias mensagens WSM informativas do trecho. É por meio desse pacote de dados que são transmitidos os aspectos dos sinais luminosos, as indicações das máquinas de chave e os alarmes de sensores de segurança, como detectores de descarrilamento e entre outros.

Essa interdependência estrutural e lógica pode ser observada na Figura 3, que ilustra o monitoramento em tempo real das transmissões de WSM em dois rádios adjacentes. A interface evidencia como as informações são estritamente interligadas na malha de comunicação: a ausência ou a degradação de pacotes e ou WSMs, indicada em vermelho pela queda da disponibilidade, não se isola no equipamento de origem, mas reflete sistemicamente nos rádios vizinhos. Constata-se que, mesmo em cenários de intervenção e manutenção planejada, em que um ativo de campo é desativado de forma controlada, a supressão dessa WSM afeta instantaneamente a percepção e disponibilidade da rede adjacente.



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários

ANP
TRILHOS
TIC TRENS

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

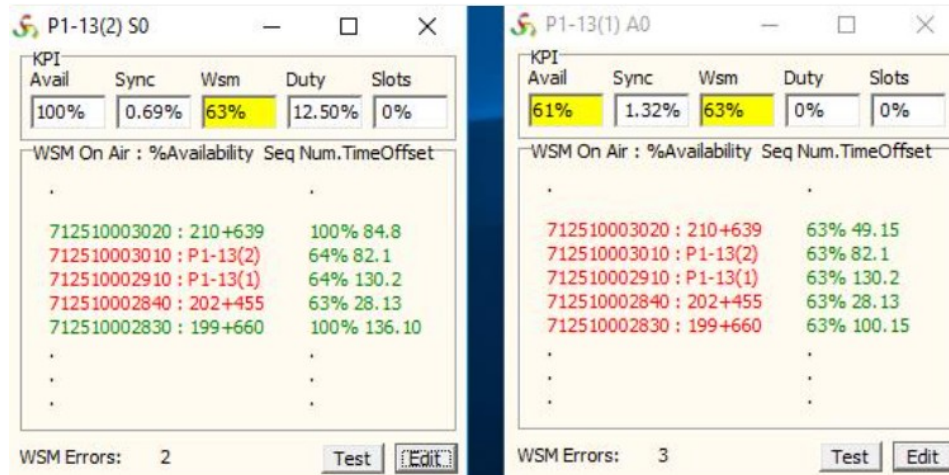


Figura 3 - Informações de WSM em tempo real. Fonte: Interface do sistema de gerenciamento de Rádios de Dados (Acervo técnico MRS Logística, 2026).

O fluxo íntegro dessas mensagens é o que permite ao computador de bordo calcular e atualizar sua autoridade de movimento com segurança. Qualquer corrupção, atraso ou congelamento no envio desses dados específicos impede a renovação do licenciamento do trem, provocando a parada imediata da composição. Para que todos esses fluxos lógicos e transmissões distintas coexistam nos rádios sem sobreposição ou interferências, a rede exige uma coordenação temporal de altíssima precisão.

O GPS como elemento de sincronismo crítico

Essa coordenação e a precisão milimétrica necessárias para o ordenamento dos slots TDMA dependem diretamente de uma referência absoluta de tempo, fornecida pelo módulo receptor de GPS embutido em cada rádio de dados (GE MDS, 2018). Esse módulo é, portanto,



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

um ativo silencioso, mas decisivo: enquanto opera corretamente, a rede mantém sua estabilidade; quando degrada, todo o protocolo de comunicação do rádio é comprometido.

Antes da falha funcional completa, a deterioração manifesta-se no *Event Log* interno do rádio por meio de alarmes, como a perda do pulso de sincronismo (*GPS PPS Not Available*), falhas de comunicação entre o rádio e o GPS (*NMEA Data - Invalid*) ou reinicializações inesperadas do receptor, decorrentes de avarias no próprio componente. A Figura 4 ilustra essa interface de terminal, evidenciando o registro dessas anomalias.

Se uma locomotiva se conecta a um rádio com o sincronismo ativamente comprometido, ocorre o corte instantâneo de tração; contudo, se o alarme ocorre sem composições no trecho, o evento é registrado sem impacto operacional imediato. É exatamente nessa janela de oportunidade, entre os primeiros alarmes latentes e a falha sistêmica na via, que a engenharia de confiabilidade concentra as ações de manutenção preditiva (KARDEC; NASCIF, 2012).



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



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

192.168.111.132 - PuTTY

P2-11 (2)			
View Event Log Menu			
Num	Date	Time	Description
== START OF EVENT LOG ==			
1884	08 May 2026	17:32	GPS PPS OK
1883	08 May 2026	17:32	GPS PPS Not Available
1882	17 Apr 2026	14:44	Parameter Changed (Event Log Host Address)
1881	15 Apr 2026	08:18	Parameter Changed (Event Log Host Address)
1880	15 Apr 2026	08:16	Parameter Changed (Event Log Host Address)
1879	09 Apr 2026	16:29	Parameter Changed (Event Log Filename)
1878	09 Apr 2026	16:29	Parameter Changed (Event Log Host Address)
1877	25 Mar 2026	09:36	GPS PPS OK
1876	25 Mar 2026	09:35	GPS PPS Not Available
1875	09 Mar 2026	17:17	GPS PPS OK
1874	09 Mar 2026	17:17	GPS PPS Not Available
1873	23 Feb 2026	02:49	NMEA Data - Valid
1872	23 Feb 2026	02:47	NMEA Data - Invalid
1871	23 Feb 2026	02:47	Network Interface OK

Figura 4 – Event Log do Rádio de Dados P2-11(2). Fonte: Terminal de acesso ao rádio de dados via Telnet/ PuTTY (2026).

DIAGNÓSTICO

Os problemas observados

Tempo elevado de análise técnica por ocorrência

Quando ocorre um incidente de comunicação entre trem e via no sistema CBTC da MRS, o CCO orienta o maquinista a reportar o evento à equipe da Rádio Mecânica CBTC. Após o registro, o Centro de Diagnósticos de Confiabilidade (CDC) executa a análise técnica. No modelo manual, esse processo de análise demanda cerca de 40 minutos por ocorrência: o analista abre o arquivo de *log* do rádio, busca visualmente padrões de *timestamps*, calcula



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários

ANP
TRILHOS
TIC TRENS

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

intervalos entre *slots*, aplica regras empíricas sobre o ciclo TDMA e consolida os achados em planilhas.

O volume de incidentes torna esse esforço expressivo no agregado: em 2023 foram analisadas 440 ocorrências; em 2024, o volume saltou para 579, um aumento de 31,6% sobre o ano anterior; e em 2025 o indicador consolidou-se em 560 eventos. A carga operacional contínua se reflete também na tendência para 2026, que já acumula 244 ocorrências registradas até a última semana de maio (Figura 5). Somente no ano de 2024 (pico histórico da série), esse método manual correspondeu a aproximadamente 386 horas de trabalho técnico especializado dedicadas exclusivamente à análise reativa de *logs*.

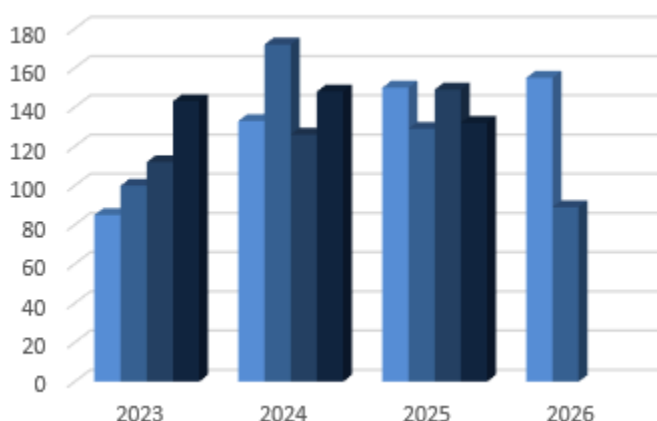


Figura 5 - Volume de análises de falhas de comunicação por trimestre (2023 a 2026). Fonte: Elaborada pelo autor, com base nos registros operacionais da MRS Logística (2026).

Efeitos operacionais da degradação não tratada

Tempo de análise é apenas um lado do problema. O outro, mais sensível para a operação, decorre dos efeitos sistêmicos quando um rádio passa a operar em estado degradado e não



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários

ANP TRILHOS TIC TRENS

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

recebe intervenção a tempo. A degradação do módulo de GPS, em particular, é silenciosa: o equipamento pode permanecer alarmando por dias, transmitindo de forma intermitente ou com sincronismo comprometido, sem que isso se torne perceptível externamente. Quando uma composição controlada pelo CBTC entra na área de cobertura desse rádio em um momento de alarme ativo, o sistema pode aplicar corte de tração e parar o trem, independentemente de o rádio ter ou não falhado completamente.

Os efeitos práticos vão além da parada em si. A normalização exige deslocamento de equipes de campo, frequentemente para regiões de difícil acesso onde o tempo de viagem supera o tempo de diagnóstico no local. Enquanto o ativo permanece alarmado ou em manutenção, o trecho opera sob restrições de velocidade ou em modo isolado, gerando efeito cascata sobre as composições subsequentes e perda de capacidade de escoamento. Os registros do CDC indicam, como referência, uma média histórica em torno de 33 trens parados por ano associados diretamente a alarmes de GPS (média dos últimos 3 anos), número que, embora relevante, não captura sozinho o custo operacional agregado das ocorrências, do acionamento corretivo de equipes e da redução da disponibilidade do trecho.

Dispersão dos alarmes e inviabilidade da coleta manual

O cenário descrito acima poderia, em larga medida, ser antecipado: os alarmes que precedem a degradação do GPS já são registrados pelos próprios rádios, em seu *Event Log* interno (GE MDS, 2018), e podem ser consultados por sessão *Telnet* a qualquer momento. O problema não é, portanto, a existência dos dados nem o acesso técnico a eles, mas sim a sua



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

descentralização, o que inviabiliza o monitoramento manual diário de todos esses ativos em campo. Cada rádio guarda apenas o seu próprio histórico, acessível somente por sessão individual com navegação manual de menus textuais. Em uma malha com mais de duzentos rádios ativos distribuídos, a coleta manual sistemática de todos os *Event Logs* consumiria, na prática, cerca de quatro horas por dia de trabalho repetitivo, esforço que torna inviável o uso desses dados como rotina de manutenção preditiva, ainda que tecnicamente os registros sempre tenham estado lá.

Esse é o cenário que motivou o desenvolvimento das duas ferramentas descritas nas próximas seções: a primeira atua sobre os logs de comunicação, tornando rápida e padronizada a análise pós-incidente; a segunda atua sobre os *Event Logs*, centralizando em escala uma informação que já existia em cada rádio, mas cuja extração e consolidação diária se mostravam operacionalmente inviáveis no modelo manual. Cada uma cobre uma camada distinta do diagnóstico e, juntas, permitem a transição efetiva da manutenção corretiva para a preditiva.

Camada reativa: analisador automatizado de logs de comunicação

O desafio da análise manual de logs

O processo convencional de diagnóstico de falhas na infraestrutura de rádio baseava-se estritamente na inspeção manual e individual de cada arquivo de *log* de comunicação após a consolidação de um incidente de perda de licenciamento na via. Essa abordagem puramente reativa e isolada demandava um tempo expressivo do corpo técnico, que precisava realizar a



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários

ANP TRILHOS TIC TRENS

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

varredura visual de milhares de linhas de texto bruto geradas pelos equipamentos. A substituição de procedimentos manuais e pouco estruturados de manutenção ferroviária por técnicas de mineração de dados sobre os registros já gerados pelos próprios sistemas tem se mostrado um caminho eficaz para apoiar a decisão e preservar a segurança operacional (KALATHAS; PAPOUTSIDAKIS, 2021).

Cada transmissão registrada nos arquivos gera múltiplos blocos com *timestamps*, identificadores de *slot*, valores de RSSI (indicador de intensidade de sinal recebido), tamanhos de pacote e sequências individuais por WSM. Na prática, os arquivos analisados pelo CDC abrangem minutos de operação, o que representa centenas ou milhares de linhas nessa estrutura. Sobre esse volume, o analista precisava executar manualmente todas as verificações: correlacionar os *timestamps* para detectar intervalos anômalos entre transmissões, acompanhar o sequenciamento dos *slots* para identificar quebras de ordem, conferir os valores de RSSI em busca de sinais degradados, rastrear o incremento dos campos Seq de cada WSM para detectar travamentos ou retrocessos, e comparar os tamanhos de pacote com o padrão esperado para identificar transmissões incompletas.

A Figura 6 ilustra um recorte real desse formato, apenas 1,5 segundos de captura, evidenciando a densidade dos dados e o esforço exigido para sua interpretação manual. Cada uma dessas verificações, aplicada linha a linha sobre arquivos de minutos de duração, tornava o processo não apenas moroso, mas também suscetível a falhas de interpretação por fadiga visual, e restringia a atuação da engenharia a eventos pontuais, inviabilizando o



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



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

processamento em larga escala necessário para identificar padrões crônicos de degradação nos ativos de campo.

```
00:00:05.24 STFP RX Slot 32 Freq 0257525000 RSSI -78, Size 113
RCP Rptr 0 BCN Size 001
RCP Rptr 1 WsR Size 030
WSM 712500204310 Seq 217 Time 0
RCP Rptr 1 WsR Size 026
WSM 712500204510 Seq 185 Time 0
RCP Rptr 1 WsR Size 029
WSM 712500200510 Seq 221 Time 1
RCP Rptr 1 WsR Size 016
WSM 712500204110 Seq 108 Time 1

00:00:06.78 STFP TX Slot 00 Freq 0257525000 Pwr 08 Size 100
RCP Rptr 0 BCN Size 001
RCP Rptr 1 WsO Size 017
WSM 712500204010 Seq 4 Time 5
RCP Rptr 1 WsO Size 029
WSM 712500200510 Seq 222 Time 4
RCP Rptr 1 WsO Size 026
WSM 712500204510 Seq 186 Time 3
RCP Rptr 1 WsO Size 016
WSM 712500204110 Seq 109 Time 4
```

Figura 6 - Exemplo de recorte de log bruto de comunicação dos Rádios de Dados. Fonte: Log de comunicação gerado pelo Rádio de Dados.

Concepção e arquitetura da solução automatizada

Para superar as limitações do modelo manual, o Analisador de Logs de Comunicação substitui a leitura humana por uma varredura algorítmica padronizada. A ferramenta é distribuída como um arquivo executável independente, dispensando a instalação de ambientes de programação adicionais nos computadores das equipes de manutenção.

Sua arquitetura opera de forma autossuficiente a partir de um diretório de trabalho central. O núcleo da inteligência de diagnóstico baseia-se no cruzamento dos arquivos de log com um arquivo estático de mapeamento (CPEINT.txt). Este arquivo atua como um dicionário de rede,



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



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

vinculando a numeração dos *slots* aos seus componentes físicos reais (*Control Points* e Intermediários). É esse cruzamento que permite ao analisador atribuir as anomalias detectadas a equipamentos georreferenciados específicos, em vez de apontar falhas genéricas em canais anônimos.

O processamento algorítmico é flexível, operando automaticamente sobre arquivos de *log* avulsos, diretórios segmentados por rádio ou arquivos compactados de *backup* global. Ao finalizar a varredura, a plataforma gera subpastas de relatórios estruturados e, em casos de processamento em massa, consolida os desvios em planilhas parametrizadas. Essa base de dados resultante viabiliza o consumo direto e a visualização dinâmica dos indicadores de saúde da rede através de *dashboards* no Power BI.

Análises técnicas e anomalias detectadas

Durante o processamento, o analisador executa uma varredura abrangente que correlaciona *timestamps* e padrões de transmissão para identificar anomalias em múltiplas camadas. As verificações realizadas de forma autônoma pelo *script* englobam as seguintes detecções:

- **Perda de pacotes:** verifica o intervalo de tempo entre as transmissões de um mesmo *slot* de WSM. Caso o tempo exceda o limite predefinido do ciclo TDMA (seis segundos), a ferramenta calcula e reporta uma estimativa matemática do número de pacotes perdidos naquele período;
- **Nível de sinal (RSSI):** monitora a força do sinal de recepção nos equipamentos Intermediários. Níveis de sinal considerados críticos (inferiores ou iguais a -100 dBm)



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



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

são registrados e destacados, indicando um início de degradação física na comunicação por radiofrequência (RF);

- **Escorregamento de tempo (*time slip*):** verifica o quão atrasado ou adiantado um pacote é transmitido dentro de seu *slot* de tempo. Os desvios são classificados em níveis de severidade (Alto, Médio e Baixo), permitindo diagnosticar problemas de sincronismo de GPS que afetam a estabilidade da rede;
- **Sequência de *slots* desordenada:** aprende dinamicamente a sequência correta de transmissão da rede (ex.: 0, 8, 16, 24, 32, 40) e verifica se a ordem é mantida. Qualquer quebra de padrão, como um *slot* transmitindo fora de sua vez, é reportada como uma falha grave de sincronismo;
- **Perda de WSM:** identifica o conjunto padrão de WSMs que cada *slot* deveria transmitir. Se uma transmissão ocorre sem todas as mensagens esperadas, o sistema aponta exatamente qual WSM faltou e em que momento;
- **Ausência longa de WSM:** monitora cada mensagem individualmente. Se uma WSM específica deixa de ser vista em qualquer *slot* por um período anômalo, o evento é reportado como falha de comunicação daquele componente específico;
- **Sequências de WSM travadas:** avalia o número de sequência de cada WSM. Se o contador para de ser incrementado e se repete múltiplas vezes (oito ou mais transmissões, ou valores específicos para determinados rádios), a sequência é



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



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

considerada travada, indicando que o equipamento de campo está retransmitindo um pacote antigo em vez de processar novas informações;

- **Sequências de WSM retrocedidas:** detecta erros lógicos de sistema ao identificar quando o contador de sequência de uma WSM, em vez de avançar ou cumprir o ciclo natural de reinício, retrocede de forma anômala;
- **Pacotes pequenos ou vazios:** estabelece dinamicamente um tamanho de referência em *bytes* para cada WSM. Se o tamanho do pacote transmitido cai drasticamente (para menos de 40% do padrão nominal), ele é sinalizado como incompleto ou corrompido.

Da análise individual à interpretação inteligente

O resultado mais imediato dessa varredura algorítmica é a inversão do papel do analista. Em vez de percorrer manualmente milhares de linhas de texto bruto em busca das anomalias descritas na seção anterior, o profissional passa a receber um relatório pronto, no qual cada desvio já foi detectado, classificado e atribuído ao equipamento físico correspondente por meio do mapeamento CPeINT.txt. A Figura 7 ilustra essa saída: um diagnóstico estruturado que parte da identificação do dispositivo e consolida, de forma objetiva, os indicadores de perda de pacotes, os escorregamentos de tempo classificados por severidade e as demais ocorrências da camada de aplicação. O trabalho técnico deixa de ser a análise em si e passa a ser apenas a interpretação de um resultado já consolidado, eliminando a leitura linha a linha e a variabilidade de critério entre analistas.



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



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

```
Analizando o arquivo: LOGs\Pico do Liro J0 09.log
=====

Horário de Início da Análise: 01:48:00
Horário de Término da Análise: 01:58:00

Slots presentes no arquivo:
Slots encontrados: ['00 (TX)', '08 (RX)', '16 (RX)', '24 (TX)', '32 (RX)', '40 (RX)']

Pico do Liro J0 : ['00 (TX)', '24 (TX)']
INT 087 J1 : ['08 (RX)', '32 (RX)']
INT 083 J2 : ['16 (RX)', '40 (RX)']

Nenhuma sequência de WSM travada foi detectada.
Nenhuma sequência de WSM retrocedida foi detectada.
Nenhuma perda de WSM foi detectada nos slots analisados.
Nenhum escorregamento de tempo foi detectado.
Nenhum slot desordenado detectado.
Nenhum pacote pequeno/zerado de WSM foi detectado.

Perdas de pacotes detectadas:
=====

INT 083 J2
(2/200 = 1.50% de perdas)

Slot 40 (RX) - 11.96 segundos entre:
01:48:36.20 STFP RX Slot 40 Freq 0256725000 RSSI -79, Size 101
01:48:48.16 STFP RX Slot 40 Freq 0256725000 RSSI -79, Size 114
Pacotes perdidos estimados: 1

Slot 16 (RX) - 11.98 segundos entre:
01:50:03.21 STFP RX Slot 16 Freq 0256725000 RSSI -79, Size 114
01:50:15.19 STFP RX Slot 16 Freq 0256725000 RSSI -78, Size 100
Pacotes perdidos estimados: 1
```

Figura 7 – Exemplo de relatório gerado pelo analisador. Fonte: Relatório gerado pela ferramenta de análise desenvolvida pelo autor.

Esse mesmo mecanismo opera tanto sobre um incidente isolado quanto sobre grandes volumes: ao receber um diretório com históricos de múltiplos rádios ou um arquivo de backup consolidado em .zip, a ferramenta processa os logs sequencialmente e exporta os achados em uma planilha estruturada, convertendo milhares de linhas dispersas em um registro histórico unificado. Embora a visualização dinâmica por painéis ainda não esteja implementada para



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

esta camada de comunicação, essa padronização constitui o alicerce técnico para mapear o comportamento dos ativos a longo prazo, estabelecendo a transição para a manutenção preditiva das potenciais falhas do sistema de rádio.

Camada preditiva: detecção de falhas de GPS via Event Logs

Centralizar os Event Logs para uso preditivo

A inteligência algorítmica detalhada na seção anterior, ao consolidar o processamento em lote da rede, estabelece o alicerce para que a ferramenta expanda seu escopo e avance da análise reativa pós-evento para o monitoramento preditivo. Esse amadurecimento estrutural permite responder de forma automatizada à segunda pergunta operacional do sistema: como identificar, em tempo útil, quais rádios já apresentam sinais de degradação que precedem uma parada de trem? A informação necessária para esse diagnóstico encontra-se registrada no *Event Log* de cada equipamento. Alarmes de GPS e as variações nos parâmetros internos do subsistema de tempo descrevem com riqueza de detalhes o histórico de comportamento do receptor. O aproveitamento de registros de eventos e logs de equipamentos para a detecção de anomalias e a antecipação de falhas é justamente a base das abordagens de manutenção preditiva orientadas a dados aplicadas à indústria ferroviária (DAVARI et al., 2021). Como detalhado anteriormente, o obstáculo nunca esteve no acesso técnico, mas na consolidação desses registros em escala.

Vale, neste ponto, delimitar o que se entende aqui por "preditivo". Não se trata de antecipar o instante exato em que um alarme será disparado pelo rádio, nem de impedir que ele



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



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

aconteça. Trata-se de detectar precocemente os rádios que já começaram a registrar falhas transientes, ainda que com eventos curtos e sem impacto operacional aparente, pequenas perdas do pulso de sincronismo de GPS que não chegam a parar nenhum trem, em geral porque, no momento da instabilidade, nenhuma composição trafegava pela área de cobertura. Esses alarmes leves são o sintoma confiável de uma degradação em curso; ignorá-los significa aguardar a próxima janela em que uma locomotiva esteja transitando pelo trecho durante uma falha, materializando uma parada compulsória na via principal.

Coleta cíclica e autônoma via Telnet

A solução desenvolvida automatiza integralmente a extração dos *Event Logs* diretamente dos ativos de campo, eliminando a necessidade de interações manuais. O sistema conecta-se, em frequência programada, a cada rádio da rede por meio do protocolo *Telnet*, realiza a autenticação de segurança e navega de forma determinística pelos menus internos até a tela de registros de eventos do equipamento. Nessa etapa, são aplicados tempos de espera calibrados para assegurar o carregamento completo de todas as linhas de texto antes da captura, salvaguardando a integridade dos dados brutos coletados.



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



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



Figura 8 – Fluxograma do sistema de coleta cíclica de Event Logs. Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Conforme exemplificado na Figura 8, esta cadeia operacional é orquestrada de forma integrada por três componentes estruturais: um arquivo de inventário parametrizado, que vincula o endereço IP ao nome lógico de cada rádio da malha; um *script* de automação .bat, encarregado de realizar a autenticação e a navegação segura pelos menus internos do transceptor; e um módulo orquestrador em lote (*batch execution*). Esse orquestrador percorre sequencialmente a lista de dispositivos, inicia as sessões de extração e centraliza os arquivos gerados em um repositório corporativo, disponibilizando o histórico consolidado de eventos para alimentar o algoritmo de classificação e os indicadores preditivos.



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



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

Integração com a operação

Para fechar o ciclo preditivo, os dados consolidados de *Event Logs* alimentam um painel de saúde dos ativos construído sobre o *SharePoint* e consumido via *Power BI*. Essa interface gerencial classifica diariamente cada rádio da malha em um dos quatro estados operacionais padronizados: *Crítico*, *Atenção*, *Sem Log* e *Normal* (Figura 9).

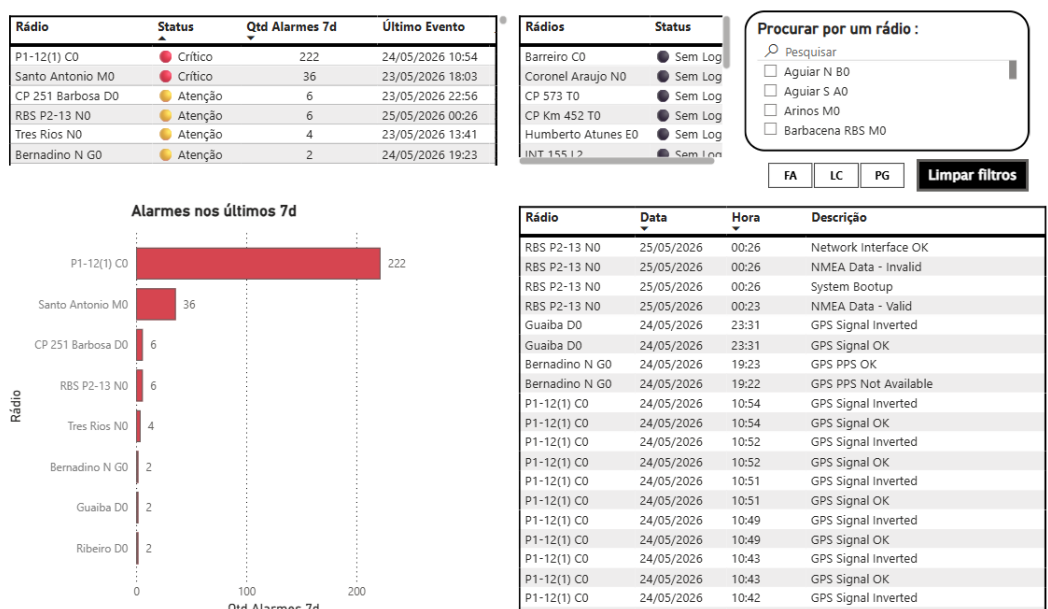


Figura 9 - Dashboard gerado com Event Log dos Rádios de Dados. Fonte: painel desenvolvido em Power BI a partir dos Event Logs.

Os ativos sinalizados nos estados *Crítico* ou *Atenção* entram imediatamente no radar de monitoramento do analista de plantão, que realiza a validação detalhada do comportamento do equipamento. Caso confirmada a necessidade de intervenção em campo, uma ordem de manutenção preditiva é aberta para que a equipe técnica atue de forma planejada no ativo,



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

eliminando a falha de sincronismo antes que ela se acentue e venha a impactar a circulação das composições na via.

Por outro lado, os equipamentos classificados no estado *Normal* indicam plena estabilidade e dispensam intervenções. Já os ativos identificados na condição *Sem Log* acendem um alerta importante capturado pela automação: nesses cenários específicos, a equipe de campo também é acionada de forma preditiva para realizar um *reset* no equipamento, procedimento necessário para restabelecer o funcionamento do sistema e forçar o transceptor a retomar a disponibilização regular de seus registros de eventos.

ANÁLISE DOS RESULTADOS

A implementação e a operação conjunta das soluções entregam ganhos expressivos em frentes complementares da manutenção. Vale destacar que as metodologias atuam em sinergia contínua: o analisador de *logs* de comunicação intervém corretivamente com extrema velocidade para caracterizar incidentes complexos, ao mesmo tempo em que sua capacidade de processamento massivo gera o histórico estruturado necessário para elevar todo o sistema de RF e WSMs à camada preditiva no futuro. Em paralelo, a automação de *Event Logs* direciona essa atuação para os alarmes internos dos rádios de dados, permitindo antecipar o impacto operacional de falhas intermitentes já existentes no ativo antes que elas interrompam a circulação de trens, retroalimentando a engenharia de confiabilidade com padrões de comportamento cada vez mais precisos (KARDEC; NASCIF, 2012).



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários

ANP
TRILHOS
TIC TRENS

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

Redução do tempo de análise técnica

Antes da automação, cada ocorrência registrada consumia, em média, 40 minutos de análise técnica. Com o analisador, esse tempo cai para aproximadamente 2 minutos por ocorrência, uma economia direta de 38 minutos por análise. Como o volume histórico registrado entre 2023 e 2026 antecede a implantação da ferramenta, a Tabela 1 não reflete horas já recuperadas, mas sim uma estimativa do ganho potencial: o que teria sido economizado caso o analisador já estivesse em operação ao longo desse período, e o que passa a ser viável a partir de sua adoção.

Tabela 1 - Volume de análises e ganho potencial em horas-homem com o analisador (2023-2026).
Fonte: Autoria própria, com base nos registros de falhas de telecomunicação.

Ano	Análises	HH manual (h)	HH automatizado (h)	Economia (h)
2023	440	~293	~15	~279
2024	579	~386	~19	~367
2025	560	~373	~19	~355
2026*	244	~163	~8	~155
Total	~1.823	~1.215	~61	~1.156

* 2026 parcial: dados até a última semana de maio.

Considerando o volume acumulado de 1.823 análises desde 2023, o analisador representa um potencial de recuperação de aproximadamente 1.156 horas de trabalho técnico especializado, esforço que, no modelo manual, era inteiramente absorvido pela leitura reativa de *logs*. Para dimensionar esse ganho na rotina, tomando-se os últimos dois anos de demanda (2024 e 2025), a economia somada de cerca de 722 horas equivale a mais de uma hora de trabalho técnico liberada por dia útil. Com a ferramenta em operação, esse tempo deixa de ser consumido pela triagem reativa e passa a estar disponível para atividades de maior valor



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



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

agregado, como o planejamento preditivo, as tratativas sistêmicas e a análise estatística do histórico consolidado.

Essa melhora de produtividade cria condições favoráveis para que a equipe amplie o escopo de atuação, contribuindo, entre outros, para a sustentação do ciclo de verificação preditiva dos *Event Logs* descrito na camada preditiva, atividade que se beneficia diretamente de uma rotina menos sobrecarregada pela análise reativa. Em conjunto, as duas camadas consolidam a transição da manutenção dos rádios de dados de um modelo majoritariamente corretivo para um modelo preditivo, alinhado às melhores práticas da função estratégica de manutenção.

Antecipação de intervenções em rádios degradados

O ganho mais estratégico da camada preditiva reside na antecipação do impacto, e não na previsão da falha em si. Ao centralizar a coleta cíclica dos *Event Logs*, o sistema permite que a manutenção monitore equipamentos que já se encontram em processo de degradação, ou seja, rádios que já registram falhas intermitentes ou pequenas perdas de sincronismo de GPS, mas que ainda não causaram a parada de um trem. Não se trata de adivinhar o momento em que o ativo vai falhar, mas de atuar de forma planejada sobre um equipamento que já falhou silenciosamente, antes que essa instabilidade gere um impacto operacional severo, como a imobilização compulsória da composição e a perda do licenciamento (JUNIOR, 2021).

Os efeitos práticos dessa antecipação são múltiplos: eliminação do risco de paradas inesperadas no trecho; preservação da velocidade máxima autorizada (VMA) das composições



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários

ANP
TRILHOS
TIC TRENS

32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

quando passam pela área coberta; substituição de deslocamentos de campo corretivos de urgência por intervenções planejadas com maior assertividade; e otimização do uso de sobressalentes, concentrando a troca apenas nos módulos com sinais consistentes de fadiga (AUTOR, 2022). Quantitativamente, o histórico aponta uma média de 33 ocorrências de Trens Hora Parado (THP) anuais relacionadas a alarmes de GPS, um passivo operacional que, com a adoção do novo modelo, apresenta um claro potencial de mitigação, viabilizando a redução progressiva desses impactos na via principal.

CONCLUSÕES

A modernização da análise técnica dos Rádios de Dados do CBTC na MRS Logística demonstra, com clareza, o efeito multiplicador da inteligência de dados aplicada à manutenção ferroviária. A abordagem em duas camadas, o analisador de *logs* de tráfego, que audita a camada lógica da comunicação, e o coletor de *Event Logs*, que consolida a saúde do *hardware* de sincronismo de toda a malha, fornece um diagnóstico de ponta a ponta, do *bit* transmitido ao pulso de tempo do GPS. O resultado prático é uma transformação concreta do trabalho da equipe: o tempo recuperado deixa de ser absorvido pela leitura manual de *logs* e passa a ser dedicado ao planejamento preditivo, e as paradas associadas à degradação de GPS deixam de ser eventos descobertos apenas após o impacto operacional para se tornarem objeto de intervenção programada. Desse modo, a engenharia de confiabilidade consolida a diretriz de que os dados latentes nos equipamentos de campo, quando adequadamente minerados e estruturados por ferramentas automatizadas, deixam de ser mero ruído operacional para se tornarem a principal evidência técnica de suporte à tomada de decisão estratégica.



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



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

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 14724:2018: informação e documentação — trabalhos acadêmicos — apresentação**. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

DAVARI, N.; VELOSO, B.; COSTA, G. de A.; PEREIRA, P. M.; RIBEIRO, R. P.; GAMA, J. **A Survey on Data-Driven Predictive Maintenance for the Railway Industry**. *Sensors*, v. 21, n. 17, 5739, 2021.

AUTOR. Referência do próprio autor omitida para preservar o anonimato na avaliação (2022).

GE MDS. **MDS TD 256 Reference Manual: data radio transceiver**. General Electric / MDS, 2018.

GODDARD, E. **Overview of Signalling and Train Control**. The 9th IET Professional Development Course on Electric Traction Systems, Londres, 2006.

JARDINE, A. K. S.; LIN, D.; BANJEVIC, D. **A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance**. *Mechanical Systems and Signal Processing*, v. 20, n. 7, p. 1483-1510, 2006.

JUNIOR, C. L. P. **Análise de viabilidade da implementação do controle de trem baseado em comunicação – CBTC: um estudo de caso da empresa MRS Logística do setor ferroviário do Sudeste Brasileiro**. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Elétrica) — Centro Universitário Academia, Juiz de Fora, 2021.



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



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

KALATHAS, I.; PAPOUTSIDAKIS, M. **Predictive Maintenance Using Machine Learning and Data Mining: A Pioneer Method Implemented to Greek Railways**. Designs, v. 5, n. 1, 5, 2021.

KARDEC, A.; NASCIF, J. **Manutenção: função estratégica**. 4. ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2012.

MOBLEY, R. K. **An Introduction to Predictive Maintenance**. 2nd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2002.

MRS LOGÍSTICA. **Conheça o CBTC**. Juiz de Fora: MRS Logística, 2014. Disponível em: <https://www.mrs.com.br>. Acesso em: 23 maio 2026.