

## **Detecção de Panes em MCH e seus Impactos Operacionais na EFC**

**Autores:** André Felipe Machado Sousa; João Pedro Augusto Costa e Valério Nunes.

### **RESUMO:**

Este artigo apresenta uma metodologia de detecção de pane de MCH (máquina de chave) através de monitoramento online, e investiga seus impactos na melhoria da eficiência operacional da Estrada de Ferro Carajás (EFC). Utilizando dados do sistema EletrologIXS e algoritmos específicos, é possível identificar condições de indisponibilidade da MCH antes que se tornem falhas. Os resultados demonstram que a solução contribui diretamente para o aumento da eficiência e confiabilidade dos processos ferroviários.

**Palavras-chave:** Eficiência operacional; Máquinas de Chave; Detecção de pane; Monitoramento.

### **ABSTRACT:**

This paper presents a fault detection methodology for switch machines through online monitoring and evaluates its impact on improving operational efficiency at the Estrada de Ferro Carajás (Carajás Railway in free translation). By leveraging data from the EletroLogIXS system and applying targeted algorithms, the approach enables early identification of switch machines' unavailability conditions before they evolve into failures. The results indicate that the proposed solution significantly enhances the efficiency and reliability of railway operations.

**Keywords:** Operational efficiency; Switch machines; Fault detection; Monitoring.

## Sumário

Resumo: .....	1
Abstract: .....	1
INTRODUÇÃO.....	4
METODOLOGIA .....	5
DESENVOLVIMENTO E RESULTADOS .....	7
CONCLUSÕES .....	16
REFERÊNCIAS .....	17

## INTRODUÇÃO

A manutenção preditiva tem se consolidado como uma estratégia essencial para garantir a confiabilidade e a eficiência de sistemas ferroviários complexos (ANTT, 2023). No contexto da Estrada de Ferro Carajás (EFC), a detecção precoce de falhas em Máquinas de Chave (MCH) é um fator crítico para assegurar a continuidade operacional e a segurança do transporte de cargas (VALE, 2025). As MCHs desempenham papel central na mudança de via dos trens, e sua indisponibilidade pode gerar impactos significativos, como atrasos logísticos, aumento de custos e comprometimento da integridade dos ativos (PEREIRA et al., 2022). Este artigo propõe uma metodologia inovadora de detecção de pane em MCHs, baseada em monitoramento contínuo e análise de dados operacionais extraídos do sistema EletroLogIXS. A solução desenvolvida utiliza algoritmos específicos para identificar condições de pré-falha, permitindo intervenções técnicas antes que os problemas evoluam para falhas críticas. A pesquisa está alinhada aos princípios de sustentabilidade operacional e busca contribuir para o aprimoramento das práticas de manutenção na EFC.

Apesar dos avanços tecnológicos na área de manutenção preditiva, ainda persistem desafios relacionados à identificação de falhas incipientes em ambientes de alta demanda (ABNT, 1994; ANTT, 2023). A proposta deste estudo é demonstrar, por meio de análise comparativa e estudo de caso, os ganhos operacionais obtidos com a implementação do sistema de detecção de pane, evidenciando sua eficácia na redução do tempo de parada e das perdas operacionais. Os resultados apresentados reforçam a importância da integração entre tecnologia, análise de dados e gestão de ativos para a evolução da manutenção ferroviária.

## **METODOLOGIA**

A abordagem adotada é quantitativa. Quanto aos objetivos, trata-se de uma pesquisa explicativa, pois busca demonstrar a relação de causa e efeito entre a implementação da detecção de pane e os ganhos operacionais observados. O procedimento técnico utilizado é o estudo de caso, centrado nas MCH localizadas na Estrada de Ferro Carajás (EFC).

Esta pesquisa respeita os princípios éticos da integridade científica, confidencialidade e transparência. Os dados utilizados foram obtidos por meio de autorização institucional da empresa responsável pela operação das MCH na Estrada de Ferro Carajás, garantindo o uso responsável das informações. Todos os dados analisados são de natureza documental e operacional, sem identificação de indivíduos, preservando o anonimato e a privacidade dos envolvidos. A pesquisa não envolve experimentação com seres humanos, não sendo necessária submissão ao Comitê de Ética em Pesquisa, conforme as diretrizes da Resolução nº 510/2016 do Conselho Nacional de Saúde.

A coleta de dados será realizada por meio de análise documental, utilizando o banco de dados interno da empresa, que contém registros de atendimentos de panes, indicadores operacionais e históricos de falhas. A análise dos dados será conduzida por meio de técnicas estatísticas, comparativas e de análise de conteúdo, com o objetivo de identificar padrões, medir impactos e interpretar os resultados obtidos antes e depois da implementação do sistema de detecção de pane.

Essa abordagem permite avaliar a eficiência operacional com base em indicadores como: tempo de resolução de falhas, número de ocorrências e perdas operacionais.

A amostra da pesquisa é composta por 569 unidades de registros operacionais, selecionados com base em critérios temporais. Os dados analisados incluem:

- Quantidade de atendimentos de pane de MCH.
- Perdas operacionais antes e depois da detecção de pane.
- Quantidade de falhas registradas no período.

A pesquisa será realizada com foco nas Máquinas de Chave (MCH) localizadas ao longo da Estrada de Ferro Carajás (EFC). O período de análise compreende os anos de 2020 a 2025, sendo que a implantação do sistema de detecção de pane ocorreu em 2022. Esse recorte temporal é fundamental para permitir a comparação entre os dados anteriores e posteriores à implementação da tecnologia.

Esta pesquisa está limitada ao escopo da EFC e ao período de 2020 a 2025. Os resultados podem variar em outros contextos operacionais ou com diferentes tecnologias de detecção.

## DESENVOLVIMENTO E RESULTADOS

### 3.1 Contextualização das MCHs na EFC

A Estrada de Ferro Carajás (EFC), inaugurada em 1985, é uma infraestrutura estratégica para o transporte de minério de ferro entre os estados do Pará e Maranhão. Com 892 km de extensão, ela conecta a região de Carajás ao Porto de Ponta da Madeira, sendo reconhecida como uma das ferrovias mais eficientes e seguras do país (VALE, 2025; ANTT, 2023).

Essa eficiência é sustentada por um sistema de sinalização moderno, baseado em controle centralizado, circuitos de via e equipamentos embarcados, que garantem a segurança e a fluidez do tráfego ferroviário (BRASIL, 2015). Um dos elementos mais críticos desse sistema é a máquina de chave (MCH), responsável por acionar os aparelhos de mudança de via (AMV). A MCH realiza o movimento das agulhas do AMV, direcionando os trens para a posição “normal” ou “reversa”, conforme o planejamento operacional, permitindo mudanças de rota com precisão (PEREIRA et al., 2022).

Entretanto, falhas na MCH podem comprometer diretamente a segurança operacional e causar atrasos logísticos (ANTT, 2023). Segundo Pereira et al. (2022), essas falhas são classificadas em três tipos: abruptas, intermitentes e incipientes. A detecção preventiva dessas falhas é realizada por meio de sensores de proximidade vital e da análise da corrente elétrica do motor da MCH. Variações fora dos padrões esperados indicam esforço excessivo, travamentos ou desgaste de componentes, possibilitando a atuação da manutenção antes que a falha se torne crítica.

De acordo com a ABNT (1994), falha é definida como a perda da capacidade de um item desempenhar a função requerida, enquanto pane refere-se ao estado de incapacidade de desempenhar essa função. No contexto ferroviário, essas falhas técnicas podem gerar o que se denomina perda operacional, que representa a redução da eficiência do sistema causada por atrasos, avarias ou má gestão.

Essas perdas operacionais impactam diretamente o desempenho logístico da ferrovia, comprometendo prazos, segurança e qualidade do transporte. Os custos associados incluem manutenção corretiva, substituição de equipamentos, indenizações por carga danificada ou extraviada, além de efeitos indiretos como perda de produtividade e confiança do cliente.

A empresa de mineração responsável pelas MCHs da EFC desenvolveu entre 2018 e 2020 um Supervisório que coleta informações de CLPs, que armazenam informações tanto dos

comandos enviados quanto das indicações recebidas dos equipamentos ferroviários (COSTA et al., 2025). Segundo COSTA et al. (2025), esse Supervisor processa os dados obtidos dos CLPs e entrega informações relacionadas à defeitos dos equipamentos ferroviários.

### **3.2 Desafios Operacionais antes da Detecção de Pane**

No período compreendido entre 1º de janeiro de 2020 e 5 de junho de 2022, foram registradas 500 ocorrências de falhas em MCHs. Com o intuito de identificar falhas com características de pane — definidas como aquelas que somente foram normalizadas após intervenção técnica — foram aplicados critérios de filtragem que consideraram apenas os eventos atendidos em até 24 horas e cujo sintoma de alarme foi classificado como “MCH sem correspondência após comando”. A partir desses critérios, foram identificadas 235 falhas com características de pane.

A análise do tempo total de indisponibilidade dos ativos, considerando a soma das 235 falhas, revelou um total de 969,19 horas de manutenção corretiva não programada, resultando em uma média de 4,12 horas por atendimento.

No que se refere ao impacto operacional, observou-se que apenas 70 das 235 falhas acarretaram perdas operacionais na ferrovia. O tempo médio de perda por evento foi de 1,07 horas, totalizando 75,21 horas de impacto operacional.

Com base nesses dados, é possível estimar uma média mensal de 2,43 horas de perda operacional e 31,3 horas de tempo de parada atribuídas às falhas de MCHs no intervalo analisado.

Como exemplo representativo, destaca-se a falha ocorrida em Açailândia no dia 05/12/2021, que resultou em 2,28 horas de tempo de parada e 0,6 horas de perda operacional. A análise dos registros históricos do ativo indica que havia um pré-alarme previamente identificado pela equipe de monitoramento, porém não foi atribuída a devida urgência ao atendimento do defeito, o que contribuiu para a ocorrência da falha.

Os dados operacionais apresentados nesta seção foram obtidos a partir de registros internos de manutenção e atendimentos de panes da EFC.

### **3.3 Implementação do Sistema de Detecção de Pane**

A empresa responsável pela manutenção das MCHs da Estrada de Ferro Carajás (EFC) opera um Centro de Monitoramento de Ativos (CMA), cuja função inclui o acompanhamento

contínuo do desempenho desses equipamentos utilizando o Supervisório de MCH (COSTA et al., 2025). Um dos principais objetivos desse monitoramento é a identificação de condições de pré-falha, de modo a evitar a evolução para falhas críticas. Para isso, são utilizados dados históricos provenientes de coletas online e programadas, os quais são processados por algoritmos que filtram e interpretam variáveis indicativas de defeitos.

Diante da necessidade de aprimorar a capacidade de detecção de falhas com características de pane — aquelas que resultam na indisponibilidade do ativo até a intervenção técnica — foi proposto, neste estudo, o desenvolvimento de um novo algoritmo baseado na análise de logs do sistema EletroLogIXS. O algoritmo foi concebido a partir das seguintes premissas lógicas:

- a) Para a posição "normal":
  - Caso, após o alarme da MCH “X” indicando ausência de correspondência para a posição “normal” transcorrido um tempo “n” segundos, não seja registrado no log o evento de confirmação de posição:
    - Classifica-se como “Ativo indisponível para normal”, se não houver comando subsequente.
    - Classifica-se como “Alarme com comando para normal”, se houver comando subsequente.
- b) Para a posição "reverso":
  - Caso, após o alarme da MCH “X” indicando ausência de correspondência para a posição “reverso” transcorrido um tempo “n” segundos, não seja registrado no log o evento de confirmação de posição:
    - Classifica-se como “Ativo indisponível para reverso”, se não houver comando subsequente.
    - Classifica-se como “Alarme com comando para reverso”, se houver comando subsequente.

A lógica foi então implementada no sistema supervisório de monitoramento, conforme o trecho de código a seguir:

Figura 1: código de detecção de pane de MCH pelo Supervisório de MCH.

```

// Verificar se após o comando subiu a variável correspondente à indicação esperada
var requiredResponseVariable = string.Format("{0}_{1}", equipment, requiredResponse);

ElectrologixsEvent nextIndication = events
    .Where(x => x.Name == requiredResponseVariable && x.Value && x.Date > lvevent.Date)
    .OrderBy(x => x.Date)
    .FirstOrDefault();

// Caso não haja manutenção em andamento e nenhuma indicação seja registrada, classifica como "Ativo indisponível"
if (identifiedProblems.All(x => x != null && x.Fail)) {
    // Lógica de tratamento para ativo indisponível
}

```

Fonte: adaptado de fonte documental (2025).

Este algoritmo representa um avanço na automação da detecção de falhas críticas em MCHs, permitindo respostas mais rápidas e assertivas por parte das equipes de manutenção. A aplicação prática dessa lógica contribuiu para a redução do tempo de indisponibilidade dos ativos e para a mitigação de impactos operacionais na ferrovia.

Após o desenvolvimento do algoritmo e sua subsequente integração ao sistema supervisorio da MCH, a partir do dia 06 de junho de 2022, o código entrou em operação contínua, demonstrando resultados positivos desde os primeiros dias de funcionamento. Destaca-se, por exemplo, a ocorrência registrada na unidade de Nova Vida, onde o sistema contribuiu para a identificação precoce de uma falha operacional. Nesse caso específico, a equipe de manutenção detectou que um dos tirantes da MCH estava impedindo a realização adequada da movimentação do equipamento, evidenciando a eficácia do algoritmo na prevenção de falhas e na melhoria da confiabilidade operacional.

### 3.4 Indicadores Operacionais Depois da Detecção de Pane

No intervalo compreendido entre 06 de junho de 2022 e 01 de fevereiro de 2025 — equivalente ao período entre 01 de janeiro de 2020 e 05 de junho de 2022 — foram registradas 334 ocorrências de falhas em máquinas de chave (MCH), considerando os mesmos critérios de filtragem aplicados a eventos oriundos de suspeita de pane.

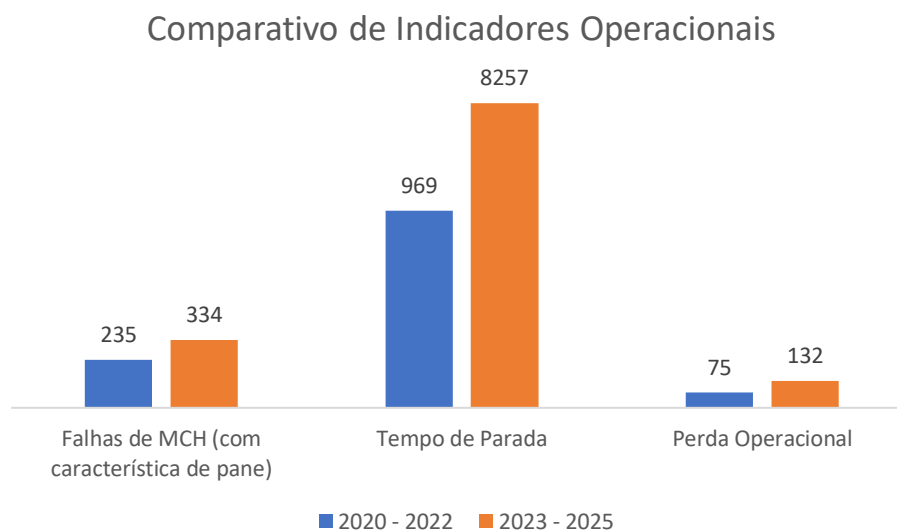
O tempo total de indisponibilidade acumulado devido a essas falhas foi de 8.257,49 horas, resultando em uma média de 24,7 horas por evento. Dentre as 334 falhas registradas, 115 ocasionaram perdas operacionais, totalizando 132,35 horas de impacto, o que corresponde a uma média de 1,15 horas por evento com perda.

### 3.5 Análise Comparativa dos Indicadores Operacionais

A comparação entre os períodos pré e pós-implementação do algoritmo de detecção de pane

revela mudanças significativas nos indicadores operacionais das MCHs da Estrada de Ferro Carajás (EFC). No intervalo de 2020 a 2022, foram registradas 235 falhas com características de pane, totalizando 969,19 horas de indisponibilidade e 75,21 horas de perdas operacionais. Já entre 2023 e 2025, esse número saltou para 334 falhas, com 8.257,49 horas de indisponibilidade e 132,35 horas de perdas operacionais.

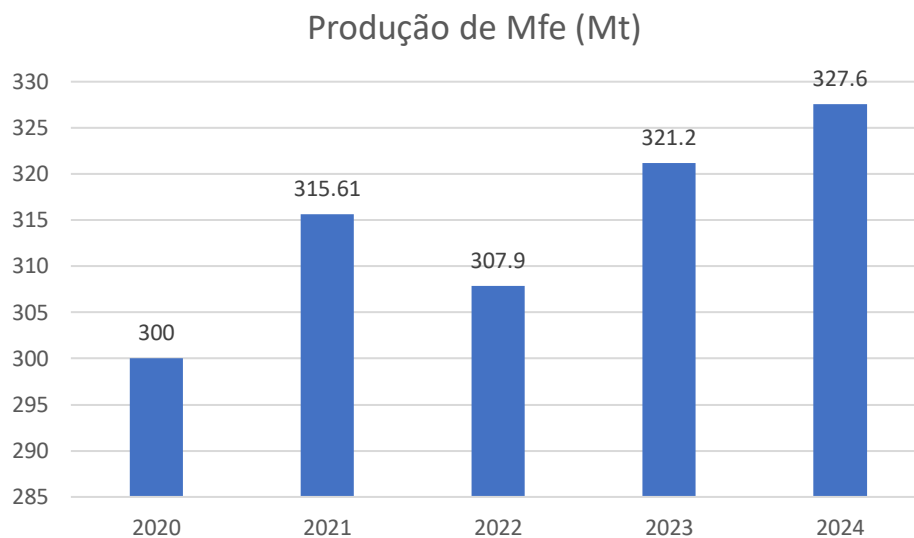
Figura 2: Gráfico comparativo de Indicadores Operacionais.



Fonte: adaptado de fonte documental (2025).

Apesar do aumento expressivo nos indicadores, é importante contextualizar esse crescimento com o aumento da demanda por transporte de minério de ferro. A produção anual da Estrada de Ferro Carajás (EFC) foi de 300,385 Mt em 2020 (VALE, 2021), 315,610 Mt em 2021 (VALE, 2022), 321,154 Mt em 2022 (VALE, 2023), 307,793 Mt em 2023 (VALE, 2024) e 327,675 Mt em 2024 (VALE, 2025). Esse aumento de carga operacional tende a acelerar o desgaste dos ativos, elevando a probabilidade de falhas.

Figura 3: Gráfico em barras da Produção de Mfe em Mt entre 2020 e 2024.

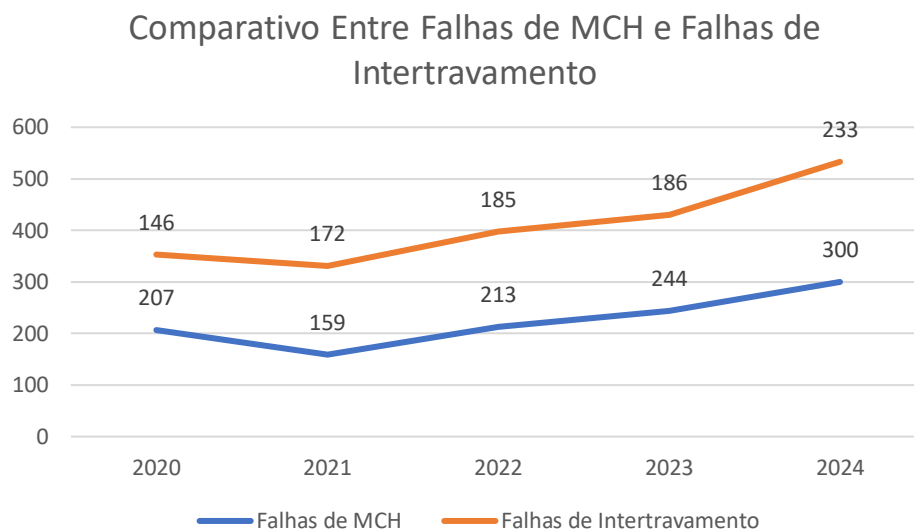


Fonte: adaptado de Vale (2021, 2022, 2023, 2024, 2025).

Além das MCHs, outros ativos como os sistemas de intertravamento também apresentaram crescimento no número de falhas, reforçando a hipótese de que o aumento da demanda é um fator sistêmico. Nesse cenário, a presença de sistemas inteligentes de monitoramento, como o algoritmo de detecção de pane desenvolvido neste estudo, torna-se essencial para mitigar os impactos operacionais.

Embora os números absolutos tenham aumentado, é plausível argumentar que, sem a ferramenta de detecção de pane, os impactos seriam ainda mais severos. A capacidade de identificar condições de pré-falha e antecipar intervenções técnicas contribuiu para evitar falhas críticas e reduzir o tempo de resposta das equipes de manutenção.

Figura 4: Gráfico de linhas sobre comparativo entre falhas de MCH e falhas de Intertravamento.



Fonte: adaptado de fonte documental (2025).

Portanto, os dados demonstram que a ferramenta não apenas se mostrou eficaz, mas também estratégica para sustentar a eficiência operacional da ferrovia em um contexto de crescimento acelerado da demanda.

### **3.6 Demandas Identificadas de Panes de MCH**

Nos anos de 2023 e 2024, a atuação do algoritmo de detecção de pane demonstrou resultados concretos na prevenção de falhas críticas em máquinas de chave (MCH). Em 2023, foram registradas 9 detecções de pane que, em decorrência da identificação precoce por meio do sistema de monitoramento, foram atendidas em campo antes da ocorrência de falha. Esses atendimentos foram programados, não resultaram em tempo de indisponibilidade ou impacto operacional, evidenciando a eficácia da ferramenta em evitar impactos à operação ferroviária.

Em 2024, o número de atendimentos aumentou significativamente, com 55 panes identificadas pelo sistema de monitoramento. Desses, apenas um caso resultou em perda operacional, com impacto de 0,38 horas e 2,93 horas de parada. Esses resultados evidenciam a eficácia do sistema em antecipar falhas e reduzir drasticamente os efeitos negativos sobre a operação.

### **3.7 Estimativa de Falhas/Perdas Operacionais Evitadas**

Diante desse cenário, é possível estimar o impacto potencial que teria ocorrido caso os

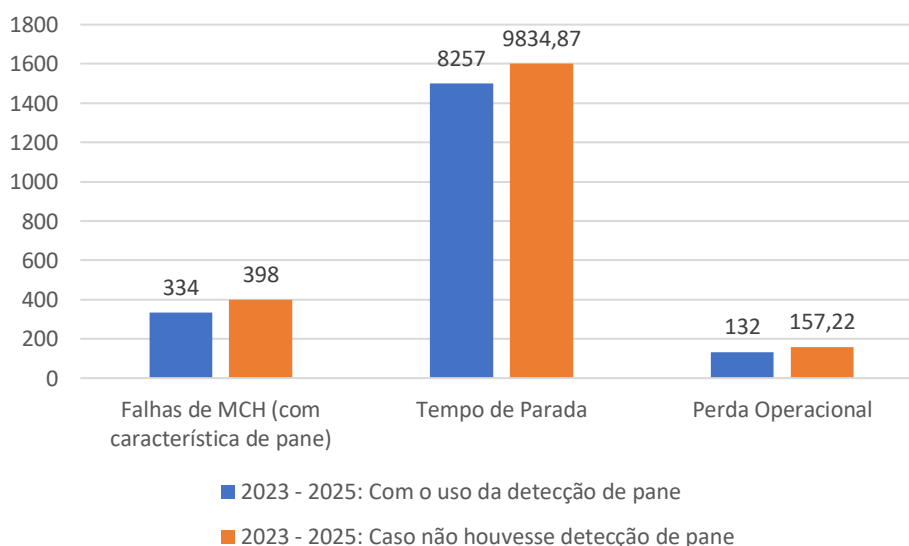
atendimentos preventivos realizados em 2023 e 2024 não tivessem sido antecipados pelo sistema de detecção. Em 2023, foram registradas 9 detecções de pane atendidas antes da falha, e em 2024, 55 atendimentos, dos quais apenas um gerou perda operacional. Se essas 64 ocorrências tivessem evoluído para falhas não detectadas, o impacto estimado seria de aproximadamente:

- 1.577,87 horas de parada ( $64 \times 24,7 \text{ h} - 2,93 \text{ h}$ , onde “2,93” representa a hora de parada gerada para atender uma das panes detectadas pelo monitoramento em 2024).
- 25,22 horas de perda operacional ( $64 \times 0,4 \text{ h} - 0,38 \text{ h}$ , onde “0,4” é o resultado entre a divisão de 334 por 132,35 e “0,38” representa a perda operacional gerada para atender uma das panes detectadas pelo monitoramento em 2024).

Esses valores representam uma redução potencial significativa nos impactos operacionais, evidenciando a efetividade do sistema de detecção em converter intervenções corretivas em ações de manutenção programada.

A seguir, apresenta-se uma representação gráfica comparativa da evolução dos indicadores operacionais observados após a implementação do sistema de detecção de pane, em contraste com uma projeção hipotética dos mesmos indicadores caso o referido sistema não estivesse em operação. Essa abordagem permite visualizar, de maneira estruturada e tecnicamente fundamentada, os benefícios concretos da detecção antecipada de falhas, especialmente no que se refere à mitigação de tempo de parada e perdas operacionais.

Figura 5: Gráfico de Barras Comparando Valores Com e Sem o uso do dispositivo de detecção de pane.



Fonte: adaptado de fonte documental (2025).

A partir da observação do gráfico, verifica-se uma melhora significativa nos três indicadores analisados após a implementação do dispositivo de detecção de pane. Os dados quantitativos demonstram reduções de:

- Falhas de MCH: 19,16%.
- Tempo de Parada: 19,10%.
- Perda Operacional: 19,10%.

Esses resultados indicam que, nos anos subsequentes à adoção da ferramenta, os valores desses indicadores seriam aproximadamente 19% superiores caso o dispositivo não tivesse sido utilizado. Portanto, a implementação do sistema de detecção contribuiu diretamente para a otimização da operação e a mitigação de falhas.

## CONCLUSÕES

A implementação do sistema de detecção de panes em Máquinas de Chave (MCH) na Estrada de Ferro Carajás demonstrou ser uma solução estratégica para enfrentar os desafios de um ambiente operacional de alta demanda. Embora os indicadores absolutos de falhas tenham aumentado, esse crescimento está diretamente relacionado à intensificação da produção e ao desgaste natural dos ativos. Nesse contexto, a ferramenta de monitoramento preditivo não apenas antecipou falhas críticas, mas também converteu intervenções corretivas em ações programadas, reduzindo em aproximadamente 19% os impactos operacionais projetados. Além disso, os resultados evidenciam ganhos significativos em confiabilidade, segurança e eficiência, reforçando a importância da integração entre tecnologia, análise de dados e gestão de ativos. Assim, conclui-se que a detecção antecipada de panes é um elemento essencial para a sustentabilidade operacional da ferrovia, garantindo maior resiliência frente ao aumento da demanda e contribuindo para a excelência nos processos logísticos.

## REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES (Brasil). Relatório estatístico ferroviário. Brasília: ANTT, 2023. Disponível em: <<https://www.antt.gov.br/>>. Acesso em: 11 ago. 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5462: Confiabilidade e manutenibilidade. Rio de Janeiro: ABNT, 1994.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Manual de operação ferroviária. Brasília: DNIT, 2015.

COSTA, João Pedro Augusto et al. Novel heuristic for supervisory control in railway switch machines. *International Journal of Modelling, Identification and Control*, [S.l.], v. 42, n. 4, p. 232–244, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1504/IJMIC.2024.144032>.

PEREIRA, Humberto Aparecido Brufatto; SILVA, Marcos Vinícius; SANTOS, João Carlos dos. Diagnóstico de falhas em máquinas de chave ferroviárias: um estudo de caso na EFC. *Revista XYZ*, [S.l.], v. 10, n. 3, p. 45–60, 2022.

VALE S.A. Estrada de Ferro Carajás. Rio de Janeiro: Vale S.A., 2025. Disponível em: <<https://vale.com/>>. Acesso em: 11 ago. 2025.

VALE S.A. Relatório de Produção e Vendas 2020. Rio de Janeiro: Vale S.A., 2021. Disponível em: <<https://vale.com/>>. Acesso em: 11 ago. 2025.

VALE S.A. Relatório de Produção e Vendas 2021. Rio de Janeiro: Vale S.A., 2022. Disponível em: <<https://vale.com/>>. Acesso em: 11 ago. 2025.

VALE S.A. Relatório de Produção e Vendas 2022. Rio de Janeiro: Vale S.A., 2023. Disponível em: <<https://vale.com/>>. Acesso em: 11 ago. 2025.

VALE S.A. Relatório de Produção e Vendas 2023. Rio de Janeiro: Vale S.A., 2024. Disponível em: <<https://vale.com/>>. Acesso em: 11 ago. 2025.

VALE S.A. Relatório de Produção e Vendas 2024. Rio de Janeiro: Vale S.A., 2025. Disponível em: <<https://vale.com/>>. Acesso em: 11 ago. 2025.