



Manutenção Preditiva em Máquinas de Chave Ferroviárias

João Pedro Augusto Costa^{1*}, Thiago Ferreira Souza¹, Adriano Rodrigues², Suilan Maia², Eggo Pinheiro², Valerio Nunes¹, Rodrigo Albuquerque², Henrique Vilela¹, Aliny Santos¹

¹ Gerência de Manutenção Eletroeletrônica EFC, Vale S.A, São Luis, Maranhão

² Gerência de Tecnologia EFC e Pelotização, Vale S.A, São Luis, Maranhão

Resumo: Aparelhos de mudança de via são essencialmente equipamentos utilizados para mover trens de uma linha para outra. Como mecanismos móveis, são sujeitos a falhas ao longo do tempo. Em ferrovias modernas, os Aparelhos de Mudança de Via (AMV) são operados por meio de Máquinas de Chave (MCH) ferroviárias, o que permite a operação de forma remota. Em geral, máquinas de chave recebem comandos de um Controlador Lógico Programável (CLP), que armazena em memória não volátil as informações históricas sobre os comandos enviados e as indicações recebidas dos equipamentos de via. Estes dados históricos permitem uma análise de dados em busca de possíveis desvios na operação dos equipamentos. Neste trabalho, é apresentada uma técnica para detecção de anomalias em máquinas de chave, ocorrências estas, que podem ser indicativos de futuras falhas em aparelhos de mudança de via, assim como nas MCH. Os resultados obtidos por esta técnica mostram que é possível reduzir o número de falhas em quase 50% utilizando informações obtidas por nosso algoritmo como ponto de partida para manutenção preditiva.

Palavras-Chaves: AMV, MCH, Preditiva, Algoritmo

1. Introdução

Linhas paralelas e pontos de cruzamento são estruturas fundamentais para ferrovias com alta demanda de circulação. Múltiplas linhas permitem maior flexibilidade nas situações de operação e manutenção. Considerando ferrovias de médio e grande porte, se torna inviável realizar a movimentação dos AMV manualmente, portanto, a operação de máquinas de chave geralmente é integrada a lógica da movimentação dos trens.

Na medida que o operador de despacho de trens não precisa se preocupar com a movimentação individualizada de cada AMV, um fluxo complexo é executado de forma a possibilitar a operação remota das MCH, conforme

Figura 1. Este procedimento pode vir a ocorrer dezenas ou centenas de vezes diariamente em cada aparelho de mudança de via em uma ferrovia, o que leva a um desgaste natural dos dispositivos.

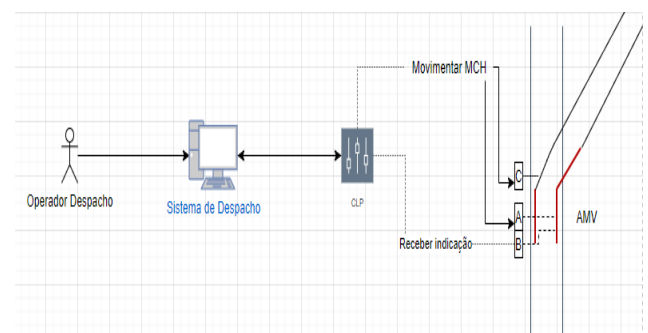


Fig. 1 Fluxo de Despacho de Trens

2. Metodologia

De forma a investigar as anomalias em máquinas de chave que podem caracterizar um indício de falha, foi desenvolvida uma heurística. A técnica consiste em monitorar uma confirmação de posição (indicação), o que é naturalmente esperado após um comando. De forma a verificar o benefício obtido com essa técnica, foram comparados os números de falhas em máquinas de chave antes e depois da utilização do algoritmo desenvolvido.

De forma a mensurar a significância da redução do impacto operacional, foram analisados os valores de impacto dos 12 meses anteriores a implantação da heurística, como os 12 meses posteriores a utilização desta técnica.

3. Fundamentação Teórica

Um Aparelho de Mudança de Via (Figura 2) é um equipamento que permite que um trem seja guiado de uma linha para outra [2].

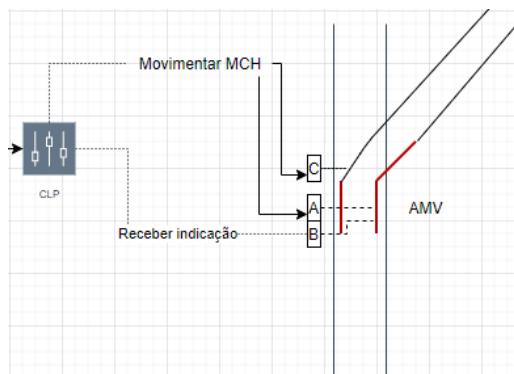


Fig. 2 Aparelho de Mudança de Via (AMV)

A condição esperada para um AMV é que sua posição se encontre em um de dois possíveis estados:

- **Normal:** Quando o AMV está alinhado de forma que o trem irá permanecer na mesma linha na qual ingressou no aparelho.

- **Reverso:** Quando o AMV está alinhado de forma que o trem irá mudar de linha em relação a de entrada no aparelho.

O fluxo de um movimento, que pode ser Normal para Reverso, ou Reverso para Normal pode ser operado manualmente com a utilização de marombas ou manivelas, ou no caso de ferrovias modernas, por meio de Máquinas de Chave. Diferentes configurações podem ser utilizadas para movimentar um AMV. No caso deste trabalho, cada aparelho é movimentado com a utilização de três MCH [A, B, e C]. Adicionalmente, as máquinas A e B possuem sensores que indicam a conclusão do movimento.

O procedimento de movimentação pode ser traduzido para uma linguagem mais próxima ao que se encontra no CLP. O procedimento abaixo ilustra o fluxo de requisição de movimento de um AMV (W1) para a posição Normal:

1. **W1A_NWR = True** ← Requisita a movimentação da máquina A do AMV W1 para a posição Normal.
2. **W1B_NWR = True** ← Requisita a movimentação da máquina B do AMV W1 para a posição Normal.
3. **W1C_NWR = True** ← Requisita a movimentação da máquina C do AMV W1 para a posição Normal.
4. **W1A_RWP = False** ← Indicação que confirma que a posição da máquina A do AMV W1 não é mais Reverso.
5. **W1B_RWP = False** ← Indicação que confirma que a posição da máquina B do AMV W1 não é mais Reverso.
6. **W1C_RWP = False** ← Indicação que confirma que a posição da máquina C do AMV W1 não é mais Reverso.
7. **W1A_NWP = True** ← Indicação que confirma a posição da máquina A do AMV W1 como Normal.

8. **W1B_NWP = True** ← Indicação que confirma a posição da máquina B do AMV **W1** como Normal.
9. **W1C_NWP = True** ← Indicação que confirma a posição da máquina C do AMV **W1** como Normal.

Conforme descrito anteriormente, na estrutura deste trabalho, a movimentação de cada AMV é realizada por três máquinas de chave. A confirmação da posição do AMV e consequente liberação para passagem de um veículo ferroviário, só acontece quando houver a indicação de posição das 3 MCH.

4. Estrutura de Dados no PLC

Todo o fluxo de **Comando** → **Indicação** que ocorre em cada AMV da ferrovia é armazenado no log de dados do Controlador Lógico Programável (CLP) que é conectado eletricamente as MCH responsáveis pela movimentação. A estrutura de dados do log de dados é simples, consistindo em múltiplas entradas indexadas por uma data. Um exemplo de entrada pode ser visualizado abaixo:

```

01-16-21          17:54:30
3D2T_TPTE =F 3D2T_TPR =F
3D2T_TK =T

```

O Exemplo acima indica que em 16/01/2021 as 17:54:30, as variáveis **3D2T_TPTE** e **3D2T_TPR** tiveram seu valor modificado para falso, enquanto a variável **3D2T_TK** teve seu valor modificado para verdadeiro. As entradas no log de dados do CLP são atualizadas à medida que novos eventos ocorrem na ferrovia. Esse arquivo é utilizado para obter os dados necessários para realizar análise histórica do comportamento das máquinas de chave, que servem como uma espécie de sensor do comportamento do AMV.

5. Variáveis de Máquinas de Chave e Defeitos em Aparelhos de Mudança de Via

A princípio, o log de dados de cada PLC, pode se assimilar a uma série de mudança de estados que não trazem muita informação. Porém, se uma variável for segmentada, percebe-se que suas mudanças de estado ao longo do tempo, formam uma série temporal. A Figura 3 apresenta uma série correspondente a variável de comando para normal (NWR) de uma máquina de chave arbitrária. Conforme visto anteriormente, existem dois estados possíveis (T ou F). Neste caso específico, cada vez que o operador no centro de controle solicita a movimentação do AMV para normal, ocorre um pulso (NWR=T) por parte da MCH.



Fig. 3 Série **NWR**

À medida que mais variáveis são analisadas como series temporais [3], é possível observar relações interessantes. A Figura 4 apresenta o cenário anterior acrescido da variável NWP (confirmação da indicação para normal), que é apresentada graficamente em azul. Visualizando graficamente as duas séries, se torna fácil observar o relacionamento claro entre as variáveis.

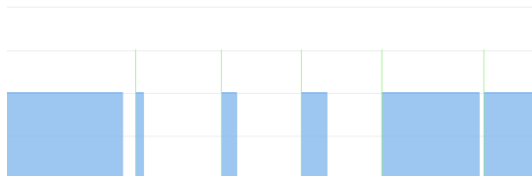


Fig. 4 Séries **NWR** e **NWP**

Adicionando a nossa análise as variáveis de requisição de comando para reverso (**RWR**), apresentada em laranja e de indicação para reverso (**RWP**), apresentada em preto, se consegue identificar o fluxo desejado para uma máquina de chave, conforme Figura 5.

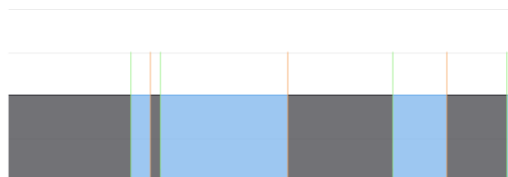


Fig. 5 Séries **NWR**, **NWP**, **RWR**, **RWP**

Apresentada a visualização do fluxo desejado para uma movimentação de MCH, é possível questionar se os processos sempre ocorrem da forma adequada. Uma movimentação de sucesso de uma máquina de chave, depende basicamente de três pontos:

1. Um comando (**NWR** ou **RWR**) é enviado com sucesso para a máquina de chave.
2. A indicação anterior é anulada (**NWP=F** ou **RWP=F**).
3. A indicação solicitada é ativada e persiste neste estado até a próxima solicitação de movimentação (**NWP=T** ou **RWP=T**).

Estes três passos estão sujeitos a erros, porém, o passo 3 geralmente é mais problemático, porque, depende da movimentação completa do AMV e da confirmação contínua da posição do aparelho.

As Figuras de 6 e 7 representam os problemas mais frequentes que podem ser identificados realizando uma análise temporal das variáveis relacionadas a máquina de chave nos dados do CLP.

A Figura 6 representa uma máquina de chave na posição Normal (**NWP=T**), que por vezes perde a indicação de posição (**NWP=F**), sem ocorrência prévia de qualquer solicitação de comando para Reverso (**RWR=T**). Para fins de referência, chamamos esta condição de **Perda-Indicação-Normal**.

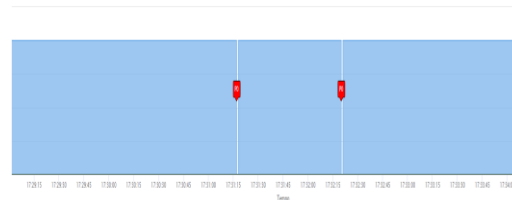


Fig. 6 Perda de Indicação para Normal (**NWP=F**)

Na Figura 7, é apresentada a visualização de uma máquina que estava na posição Normal (**NWP =T**), houve uma solicitação de comando para Reverso (**RWR=T**), a indicação para Reverso foi ativada (**RWR=T**), porém houveram várias intermitências (**RWP=F**) sem qualquer comando do operador de despacho. Esta condição aqui neste trabalho é identificada como **Perda-Indicação-Reverso**.

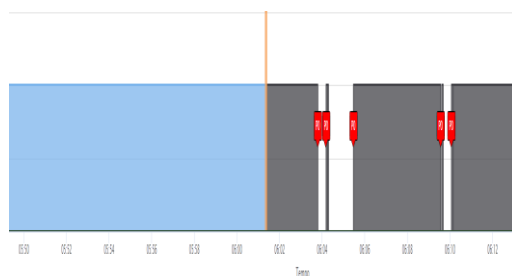


Fig. 7 Perda de Indicação para Reverso (**RWP=F**)

É importante compreender que os problemas descritos acima, ocorrem dezenas de vezes diariamente em uma ferrovia que possui centenas de AMV e MCH. Muitas dessas ocorrências não são analisadas em detalhes, porque o objetivo da operação ferroviária é a otimização da circulação de trens, portanto, uma perda de indicação rápida, que não interfere na circulação

de um trem, não possui relevância em termos de impacto operacional. Por outro lado, qualquer condição que possa indicar desgaste em um aparelho de mudança de via ou máquina de chave é muito importante para as áreas de manutenção, visto que, uma perda de indicação com duração de alguns segundos pode penalizar a circulação de um trem que esteja passando pelo AMV.

6. Heurística Proposta

Considerando o alto número de eventos que podem indicar desgaste nas Máquinas de Chave e nos Aparelhos de Mudança de Via [1], foi desenvolvido um algoritmo que identifica situações que podem ser sintomas de futuras falhas nos AMV.

A Figura 8 apresenta o algoritmo desenvolvido para identificar situações em que a indicação atual da máquina foi desativada sem a ocorrência anterior de uma solicitação de comando para a posição contrária. O processo consiste em percorrer todas as mudanças de estado nas variáveis de indicação. Se não houver um comando anterior ou o tempo decorrido entre o último comando e a mudança de estado da indicação for maior que um parâmetro de limite, essa mudança de estado é considerada uma perda de indicação e adicionada a um conjunto de defeitos.

```
1 Function IdentifyCommandForIndication(PLCData)
2   data ← PLCData;
3   indicationLoseTimeInSeconds ← 7;
4   defects ← 0;
5   for currentIndication ← Union(NWP, RWP) do
6     correspondentCommand ← previousCorrespondentCommand;
7     if (Exists(correspondentCommand) and
        TimeDiff(correspondentCommand.time,
        currentIndication.time) > indicationLoseTimeInSeconds) or
        Not Exists(correspondentCommand) then
8       AppendToDefects( {date = currentIndication.Date,
        pointMachine=currentIndication.pointMachine, description
        = 'Indication lose without command'});
9     end
10  end
11 end
```

Fig. 8 Algoritmo de Verificação de Perda de Indicação

É importante notar que os eventos identificados por estas heurísticas em geral não são identificados pelo setor de manutenção, que não consegue atuar no nível granularidade de uma solução computacional, considerando as centenas de movimentação realizadas em AMV diariamente. A Figura 9 apresenta uma condição identificada pelo algoritmo, que foi encontrada em campo. A abertura entre a parte móvel do AMV e o trilho de encosto, causa uma intermitência na indicação que confirma a posição atual do AMV.



Fig. 9 Abertura entre Parte Móvel e Trilho de Encosto

Este algoritmo foi desenvolvido para possibilitar um monitoramento refinado do comportamento da operação remota das máquinas de chave da ferrovia, possibilitando o agendamento de manutenções preditivas nas Máquinas de Chave e nos aparelhos de Mudança de Via.

7. Resultados

O uso do algoritmo de verificação foi iniciado em Agosto de 2019, o que significa que desde esse mês, as equipes de manutenção recebem notificações sobre comportamentos que podem indicar futuros problemas nos conjuntos de AMV e MCH de toda a ferrovia. É importante registrar que por vezes, as equipes de manutenção recebem as informações, mas não conseguem o tempo necessário para atuação das equipes do campo. Essa condição pode ser causada por estratégias diversas relacionadas a otimização do tráfego na ferrovia, estando além do escopo deste artigo.

Para construir o experimento desta seção, foram utilizados apenas eventos que causaram impacto operacional. Todos os eventos nesta condição, de Agosto de 2018 até Agosto de 2020 foram considerados, garantindo assim que não haja ruídos causados por sazonalidade nos resultados.

A quantidade de impacto eventos relacionados a **Perda-Indicação-Normal** por mês é apresentada na Figura 10, enquanto o impacto dos eventos de **Perda-Indicação-Reverso** pode ser visualizado na Figura 11.



Fig. 10 Impactos Operacionais relacionados a **Perda-Indicação-Normal**



Fig. 11 Impactos Operacionais relacionados a **Perda-Indicação-Reverso**

Relacionado aos impactos de **Perda-Indicação-Normal**, pode-se perceber que o mês com maior valor está localizado antes do início do monitoramento (representado pela coluna laranja). A Tabela 1 apresenta as informações de forma consolidada, mostrando que o valor médio de impacto após o monitoramento caiu, além de que o maior valor de impacto ocorreu antes do monitoramento via algoritmo.

	Antes do Monitoramento	Depois do Monitoramento
Min	1,73	0,53

Max	8,05	6,14
Média	4,75	3,14
Desvio Padrão	2,14	1,92

Tabela 1 Impacto Operacional causado por **Perda-Indicação-Normal**

Relacionado ao impacto operacional causado por eventos de **Perda-Indicação-Reverso**, temos a informação consolidada apresentada na Tabela 2. Dos valores apresentados, pode-se assumir que o impacto operacional médio por mês foi menor após a implantação do algoritmo de monitoramento. O fato de o desvio padrão ser menor no conjunto de meses antes do início do monitoramento, pode ser explicado pela maior quantidade de meses sem impacto operacional causado por esse tipo de evento após o início do monitoramento.

	Antes do Monitoramento	Depois do Monitoramento
Min	0	0
Max	5,26	5,06
Média	3,05	2,02
Desvio Padrão	1,66	1,75

Tabela 2 Impacto Operacional causado por **Perda-Indicação-Reverso**

8. Conclusão

Este trabalho apresenta uma heurística desenvolvida com o intuito de identificar desvios de comportamento nas operações de máquina de chave em

uma ferrovia. Estes desvios de comportamento geralmente são indícios de desgaste nos componentes das Máquinas de Chave e dos Aparelhos de Mudança de Via, o que geralmente resulta em falhas e impactos operacionais. O algoritmo desenvolvido utiliza informações históricas contidas no PLC de forma a identificar futuras falhas e alertar as equipes de manutenção ao longo da ferrovia, possibilitando a aplicação de manutenção preditiva.

O uso das anomalias identificadas pelo algoritmo desenvolvido permite que os times de manutenção planejem as intervenções, o que causa menos impacto operacional que manutenções corretivas. Os resultados apresentados comprovam a hipótese que justifica o desenvolvimento deste estudo: As MCH e os AMV naturalmente começam a apresentar degradação durante as operações. Então um método heurístico pode identificar esses sinais através de análises de séries temporais. Com a identificação destes sinais, se torna possível evitar falhas, garantindo assim que os equipamentos operem em um nível de confiabilidade maior.

9. Agradecimentos

Agradecimentos as áreas de Manutenção Eletroeletrônica e Tecnologia Operacional da Estrada de Ferro Carajás por ceder todos os recursos necessários para o desenvolvimento deste trabalho.

10. Referências

- [1] Vileiniskis, Marius, Rasa Remenyte-Priscott, and Dovile Rama. [A fault detection method for railway point systems](#). Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit 230.3 (2016): 852-865.
- [2] García Márquez, Fausto Pedro, Clive Roberts, and Andrew M. Tobias. [Railway](#)

point mechanisms: condition monitoring and fault detection. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit 224.1 (2010): 35-44.

[3] COSTA, João Pedro Augusto et al. Deep Neural Networks Applied to the Dynamic Helper System in a GPGPU. In: International Conference on Artificial Intelligence and Soft Computing. Springer, Cham, 2019. p. 29-38.