

PARAMETRIZAÇÃO DE ALARMES DO MONITOR ACÚSTICO DE ROLAMENTO: QUATRO ESTUDOS DE CASO

Fellipe Castro Barbosa Costa, Especialista Ferroviário, MRS Logística, Brasil

Alexandre Lima de Carvalho, Especialista Ferroviário, MRS Logística, Brasil

Ana Luíza Martins Leão, Estagiária Ferroviária, MRS Logística, Brasil

RESUMO

O Monitor Acústico de Rolamento (*ABD - Acoustic Bearing Detector*) é um *wayside* capaz de detectar defeitos de rolamentos e alertar sobre potenciais falhas através da análise acústica de ruídos. De posse das informações coletadas pelo equipamento em campo, é possível classificar as falhas quanto à severidade, componente defeituoso e intensidade do sinal gerado. Nesse viés, o presente trabalho tem como objetivo apresentar quatro aplicações práticas construídas a partir de análises de dados gerados pelo ABD. Foram analisadas quatro situações características onde o aprofundamento na análise das informações desse equipamento aplica-se em ganho de disponibilidade (1), segurança (2), confiabilidade (3) e previsibilidade (4).

Palavras-chaves: *Waysides*; Monitor Acústico de Rolamento; Análise de Falhas; Vagões; Rolamento; Parametrização.

1. INTRODUÇÃO

Atualmente o modal ferroviário tem soluções eficazes para atuar preventivamente e corretivamente nos ativos visando a segurança. Nesse viés, garantir a confiabilidade do material rodante através de equipamentos instalados ao longo da linha férrea é uma das soluções.

O monitoramento de vagões é de suma importância, uma vez que estes possuem uma gama de componentes que poderão falhar em algum momento, seja por desgastes naturais ou agentes externos.

Dessa forma, temos como foco neste trabalho o monitor acústico de rolamento (figura 1), onde através dele é possível caracterizar falhas de rolamentos, monitorar suas evoluções, montar cronogramas de inspeção e definir planos de manutenção.

Outrossim, conhecer os possíveis tipos de falhas desses componentes e apontar parâmetros mais efetivos e eficientes de manutenção faz-se necessário para garantir a segurança operacional desses ativos, diminuindo o Hxh (homem hora) em oficinas, aumentando a disponibilidade de vagões e evitando degolas de manga de eixo.

Tratando especificamente do tema introduzido, buscou-se através da utilização dos dados gerados pelo monitor:

- A) Diminuir as paradas não programadas de trens em oficina para remoção de vagões com rolamentos alarmados pelo ABD;
- B) Priorizar o atendimento aos rolamentos críticos de uma frota específica que foi afetada pela oxidação externa da capa dos rolamentos;

- C) Reduzir os eventos de alarmes de rolamento aquecido que possuem modo de falha compatível com a detecção via análise de ruído;
- D) Aumentar a previsibilidade de evolução de falha [1] indicada pelo ABD através de modelagem computacional.

A utilização inteligente dos dados de um único equipamento através da definição de parâmetros de alarme e estratégias de atendimento tende a ser parte da solução para os problemas apresentados. Assim sendo, este artigo apresentará diferentes formas de manipulação de dados deste *Wayside* capaz de trazer ganhos validados em disponibilidade de ativos, segurança operacional, redução de falhas críticas com impacto na operação e previsibilidade de alarmes [2].



Figura 1. Monitor Acústico de Rolamento

2. DESENVOLVIMENTO

Os sistemas de detecção acústica de rolamentos denominados ABD são baseados na análise da assinatura acústica gerada pelos componentes internos de um rolamento (capa, cone e rolete). Uma falha característica estimula a resposta estrutural dos componentes do rolamento que emitem determinado som com características desta falha. Ao analisar esses “ruídos”, o sistema é capaz de indicar com precisão qual componente do rolamento apresenta falha e a gravidade dela, permitindo a gestão sobre a vida em operação de cada rolamento.

Esta ferramenta foi desenvolvida para detectar defeitos de rolamentos precoces e avançados (incluindo superfície estendida, cone, capa, rolete e falhas audíveis) antes que cheguem a um ponto que possa causar interrupção da operação ou até mesmo descarrilhamento devido a falha. Através de dois sensores auxiliares principais montados em um rack eletrônico de processamento de sinal e integrado a um leitor de identificação

automático por radiofrequência (RFID) é capaz de identificar um vagão, eixo ou roda com assinaturas de falhas de impacto. Além disso, é capaz de gerar histórico de tendências para falhas nos rolamentos para análise posterior e tomada de decisão sobre o ativo.

Os defeitos detectados são classificados com letras e números, conforme Figura 2, onde as letras (descrição) determinam qual o modo de falha e em qual componente está localizada, e os números (nível) determinam a severidade da falha, sendo 1 (Alto), 2 (Médio) e 3 (Leve). A descrição da falha de superfície de rolamento (RS) é determinada pela frequência da passagem do rolete – a proporção na qual os roletes se movem sobre as pistas da capa e do cone (Figura 3). Quando uma falha é claramente identificável a partir do sinal acústico gerado, o modo de falha apresentado é acrescido do descritor, conforme mostrado na Figura 4 (p, n, r, m, e, s), onde cada linha pertence a um rolamento. Como exemplo, uma falha grave na superfície da capa é classificada como RS1_p.

Categoria	Tipo	Nível	Descrição	Símbolos
Falha Clara	RS	1; 2 ou 3	_p; _n; _r; _m; _e; _s	RS1_p; RS1_n; RS1_r; RS1_m; RS1_e; RS1_s; RS2_p; RS2_n; RS2_r; RS2_m; RS2_e; RS2_s; RS3_p; RS3_n; RS3_r; RS3_m; RS3_e; RS3_s
Falha Superficial	RS	1; 2 ou 3	Sem descrição	RS1; RS2; RS3

Figura 2. Simbologia de falhas claras e superficiais para os defeitos de rolamentos no monitor

Descrição da falha	Frequência de passagem do rolete	Descritor
Cone	12,5 a 14	_n
Capa	10 a 11,5	_p
Rolete	3,5 a 4,8	_r
Múltipla	Falhas ou gravidade similar na capa e no cone	_m
Estendida	Qualquer uma das indicações acima de falha estendida	_e

Figura 3. Frequência de passagem e descritores

Falha de rolamento	Alerta de rolamento	Consistente	Achatamento de pista de roda	ErsDB
.			.	56
RS2_n		Não	.	61
RS3		Não	.	57
RS1_e		Não	.	75
RS2_p		Sim	.	60
RS3		Não	.	63
.			.	54
FBS(RS3)		Não	.	57
.			.	53
FBS(4)			.	55

Figura 4. Informações sobre a saúde de rolamentos

Entendemos que a associação de tipos de falhas de rolamentos e níveis de *ErsDB* (*Extended running surface fault decibels*) considerados altos (baseado em eventos de casos críticos vivenciados) desencadearia a seleção apenas de rolamentos considerados críticos.

O método utilizado para a parametrização dos alarmes deu-se a partir da análise dos históricos de rolamentos específicos, inseridos nos três contextos distintos, sendo eles ganho em disponibilidade (1), segurança (2) e confiabilidade (3). Nesse viés, foi possível detectar padrões na evolução de falha em cada um dos contextos, o que desencadeou a criação de parâmetros seletivos de alarmes preditivos e corretivos programados.

Na MRS Logística, o monitor acústico de rolamentos está instalado na Ferrovia do Aço no ciclo de minério, conforme mostrado na Figura 5. Sua função é suportar os processos de manutenção vigentes através do monitoramento da saúde dos rolamentos. Baseado no ruído emitido, o equipamento é capaz de indicar falhas nos componentes internos dos rolamentos bem como o nível de severidade destas, tendo sempre como base os valores de *ErsDB*.

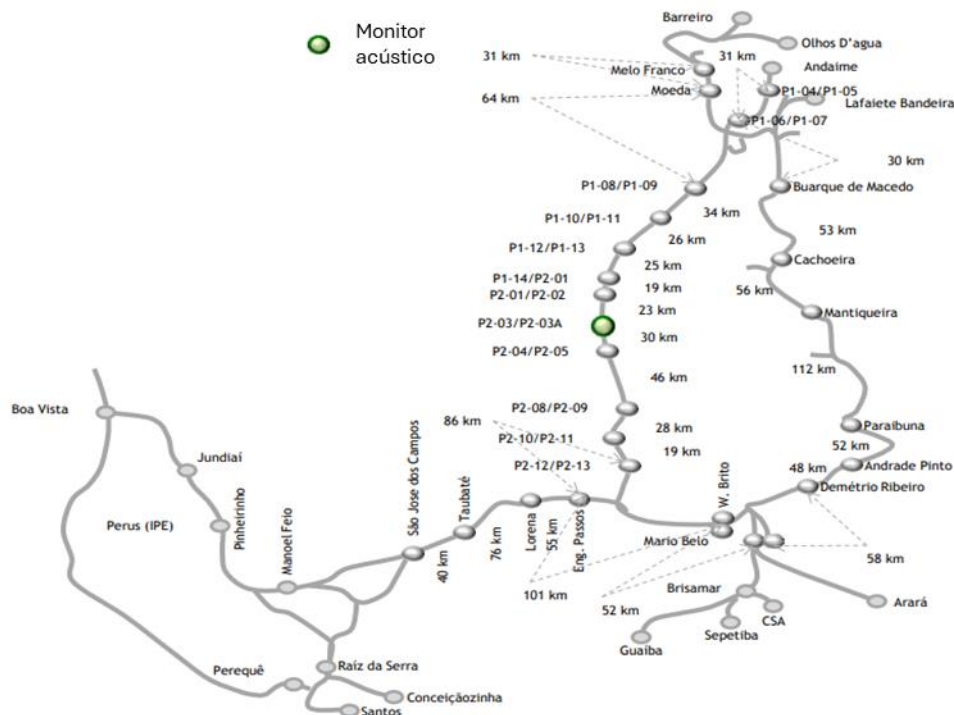


Figura 5. Localização monitor acústico, Ferrovia do aço

2.1 Caso 1 - Disponibilidade

O primeiro caso de parametrização tem foco o ganho de disponibilidade, otimizando o momento de parada dos trens para remoção dos vagões com rolamentos classificados como defeituosos pelo ABD.

O estudo de parametrização deste caso utilizou como base um grupo de rolamentos que extrapolou o limite de manutenção definido por procedimento. Todos os casos analisados demonstraram que não houve evolução significativa da falha no período de extensão do gatilho, bem como não houve aumento da temperatura de operação. Deste modo, entendeu-se que existia oportunidade de aumento do horizonte de parada dos ativos para substituição dos rolamentos alarmados. Os critérios até então adotados de remoção de operação dos rolamentos alarmados eram:

- Detecção de 2 falhas claras nível 1 – remoção por oportunidade
- Detecção de 8 falhas claras nível 1 – remoção imediata de operação

Pelo segundo critério, baseado no modelo operacional da MRS, sugere que os vagões alarmados operem, em média, por até 8.000 km. Com a nova proposta, os rolamentos não possuiriam um gatilho fixo de falhas para parada, e sim aproveitariam paradas programadas dos trens para troca do rodeiro. Desta forma, a nova estratégia de manutenção permite que os rolamentos alarmados operem por até 24.000 km com indicações de falhas claras nível 1 até que sejam removidos.

Sendo assim, foi feita a postergação da necessidade de remoção dos rodeiros alarmados de modo a casar com alguma parada programada do trem. Os rolamentos alarmados deixaram de ser a causa de paradas não programadas das tabelas de minério na MRS, diminuindo assim o impacto operacional anteriormente causado. Os vagões

utilizados no estudo para a alteração da estratégia de parada, bem como os novos vagões alarmados já no novo cenário, não apresentaram evolução significativa das falhas no período proposto, sem aumento de temperatura e sem eventos que colocassem em risco a segurança operacional.

A implementação desta iniciativa evitou a parada não programada de mais de 100 trens somente no ano de 2022. Considerando em média que os trens possuem 136 vagões e que cada uma destas paradas tem duração de 1h e 03min, estima-se um ganho próximo de 2 vagões de disponibilidade.

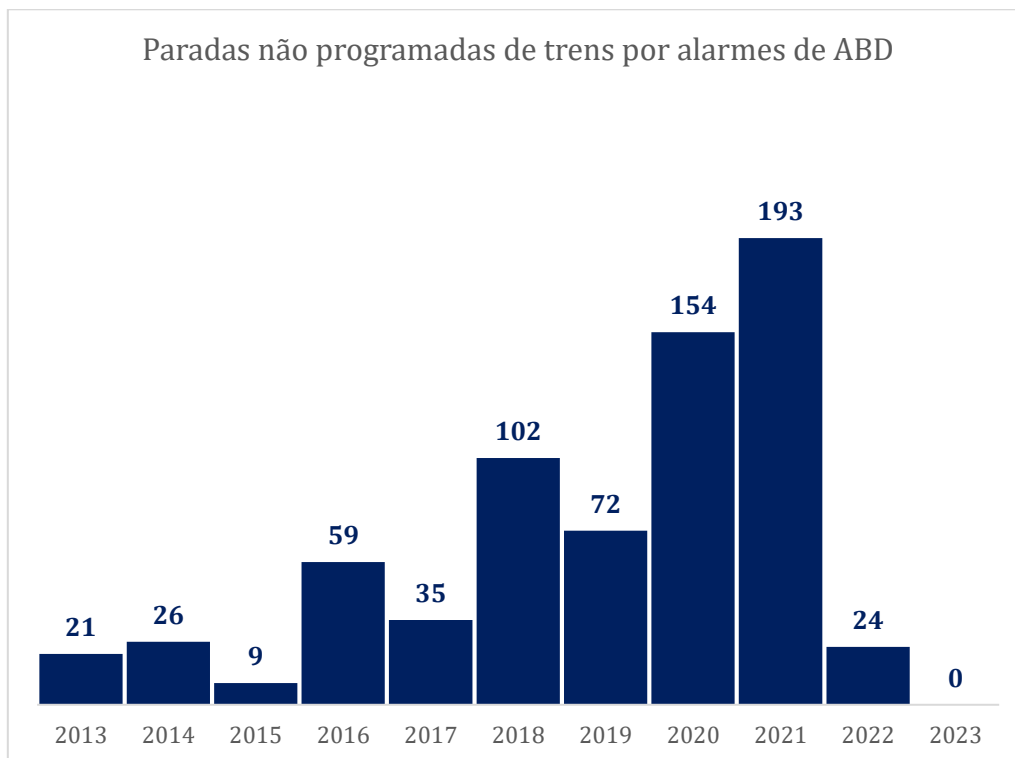


Figura 6. Paradas não programadas de trem por ano causadas por alarmes de ABD.

2.2 Caso 2 – Segurança

O segundo caso é destinado vagões que sofreram oxidação acelerada na parte externa das capas dos rolamentos. Esse grupo definido de vagões foi submetido à aspersão de água salina durante a descarga para redução da geração de poeira durante o processo. Essa atividade acelera o processo de oxidação das capas dos rolamentos, impossibilitando o micro giro da capa com o adaptador. Esse fenômeno expõe uma região fixa do rolamento às altas cargas axiais, acelerando a fadiga do componente. Por conta disso, verificou-se um aumento considerável do número de alarmes de rolamento aquecido nessa frota, levando a eventos de “quase degola”, com alto potencial de acidente – Figura 7. A rápida evolução deste modo de falha se comparado a outras frotas de vagões comprometia a segurança operacional.

Neste contexto, foi verificada a viabilidade de indicação preditiva desse modo de falha através da análise dos dados do ABD.

Entendido que esta parametrização se aplicava exclusivamente a uma frota específica (menos de 1000 vagões), foi feita uma análise retroativa dos eventos críticos de rolamentos aquecidos neste grupo para entendimento do histórico de cada rolamento

que falhou. Ficou evidente que, antes das falhas críticas, todos os rolamentos apresentavam algum sinal característico no ABD. À vista disso, buscou-se entender se o critério atendido pelos rolamentos que falharam também alarmaria rolamentos “bons” ou “pouco críticos”. Esta análise mostrou que a taxa de alarme era extremamente baixa, direcionando somente os rolamentos mais críticos da frota para manutenção, anteriormente aos alarmes de rolamento aquecido. Sendo assim, foi parametrizado um alarme preditivo, considerando um horizonte de 6 ciclos de carga e descarga (aproximadamente 6mil km), seguindo o seguinte critério:

- 6 leituras constantes com *ErsDB* maior que 58, sendo pelo menos 3 delas com indicação de Falha Potencial nível 1(RS1).

Dessa forma foi possível indicar de forma preditiva os rolamentos com potencial de falha catastrófica com tempo hábil para tomada de decisão. O resultado da criação deste critério de alarme pelo monitor acústico em conjunto com outras estratégias de manutenção adotadas na frota foi a eliminação dos eventos críticos.



Figura 7. Falha no Rolamento

2.3 Caso 3 – Confiabilidade

Na busca por iniciativas que trouxessem ganhos no indicador de confiabilidade, este estudo de caso traz consigo a proposta de antecipação de casos de alarmes de rolamento aquecido para toda a frota de vagões MRS. A metodologia aplicada seguiu o mesmo princípio apresentado no item 2.2: análise retroativa de alarmes de rolamento aquecido com foco na indicação preditiva do modo falha pelo ABD.

Tomando como base a curva PF (*Potential Failure Curve*), o resultado da evolução de falhas que geram ruído/vibração é o aquecimento (num intervalo de tempo suficiente para tal) [3]. Por outro lado, afirmar que toda falha de aquecimento teve uma

geração de ruído prévia, não é verdade. Verifica-se na prática que as falhas que levam a um alarme de rolamento aquecido podem ter relação com componentes do rolamento que não geram nenhum ruído, mas também podem estar relacionadas à evolução de falhas internas que geram ruídos identificáveis pelo monitor acústico.

Posto isto, focando na parcela de rolamentos aquecidos alarmados que tiveram uma assinatura de ruído minimamente restritiva em viagens anteriores ao alarme, propôs-se um critério que considera um horizonte de 11 ciclos de carga/descarga.

- Detecção de 9 ruídos potenciais nível 1 (NOISY RS1) e detecção de 9 ruídos com *ErsDB* maior que 65

Foi constatado um alto grau de severidade/evolução de falha interna no rolamento quando existe a indicação de NOISY RS1. A indicação constante desse modo de falha em conjunto com o valor mais elevado de *ErsDB* reforça a criticidade do rolamento e seu potencial de evolução para aquecimento. Este critério se mostrou restritivo ao ponto de poder afirmar que, um rolamento alarmado certamente evoluirá temperatura no curto prazo se não for removido de operação.

Como resultado prático desta iniciativa, pode-se citar a redução de 50% dos alarmes de rolamento aquecidos na frota *Heavy Haul*.

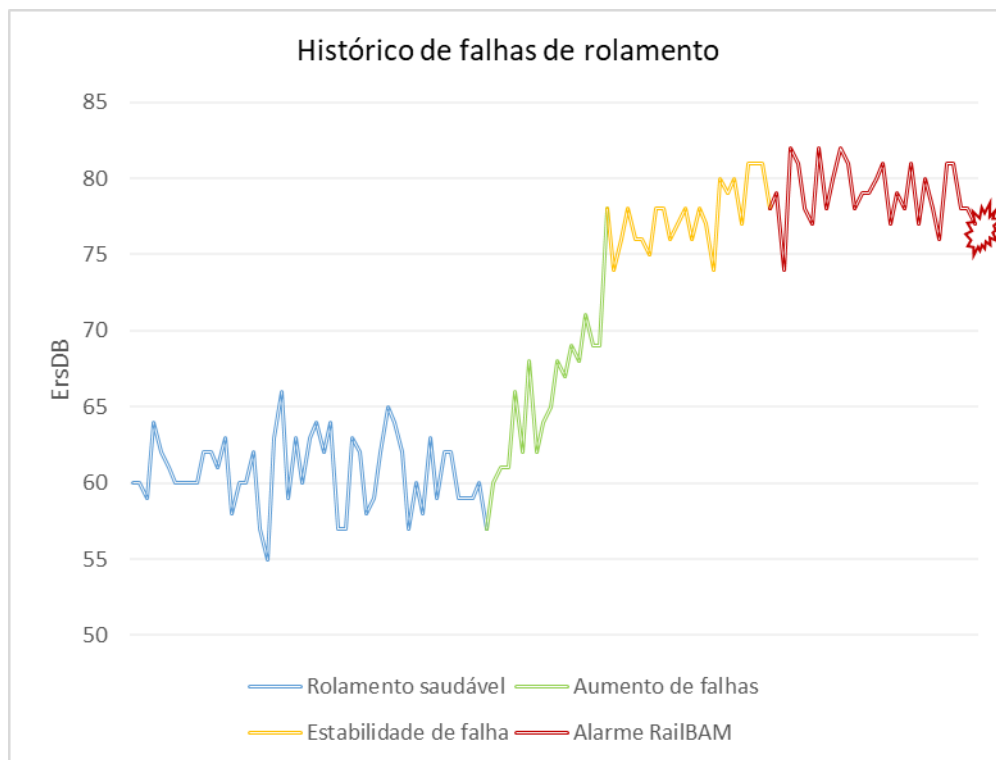


Figura 8. Histórico de falhas de rolamento aquecido alarmado.

2.3 Caso 4 – Previsibilidade

Conforme explicitado nos tópicos anteriores, espera-se do monitor acústico uma parcela de previsibilidade de alarmes para rolamentos aquecidos (maior criticidade). Por outro lado, quanto mais se afasta do topo da pirâmide de falha, maior será o número de detecções de baixa criticidade para evitar eventos críticos. Assim posto, o volume de alarmes ABD na MRS é um indicador que carece de atenção pois impacta diretamente na disponibilidade de ativos, alocação de mão de obra e ocupação de oficina. Diante disso, ter previsibilidade desses alarmes viabiliza atendimentos otimizados capazes de reduzir

os impactos supracitados. Neste contexto, estudou-se uma forma de modelagem capaz de prever alarmes acústicos de rolamentos baseado nas medições realizadas pelo equipamento [4].

A previsibilidade de alarmes ABD foi concebida utilizando uma forma especializada de inteligência artificial conhecida como rede LSTM (*Long Short-Term Memory*) [5]. Esta tecnologia tem a capacidade única de reter informações cruciais e descartar detalhes que não são relevantes ao longo do tempo. A rede LSTM leva em consideração alarmes passados para prever situações futuras. Isso permite que a estratégia utilizada faça previsões mais precisas quando se trata de manutenção preditiva [6].

Para o modelo foram utilizadas leituras temporais que levam em conta os níveis de *ErsDB*, velocidade do vagão e classificação do modo de falha do rolamento (se existente). Dentro dos históricos analisados, considera-se como 1 a probabilidade máxima de falha de um rolamento e 0 a probabilidade mínima de falha deste rolamento.

Após as simulações, o modelo apresentou o seguinte resultado:

	precision	recall	f1-score	support
0.0	1.00	0.95	0.98	35828
1.0	0.78	0.99	0.87	5887
accuracy			0.96	41715
macro avg	0.89	0.97	0.92	41715
weighted avg	0.97	0.96	0.96	41715

Figura 9. Resultado do modelo

A probabilidade de acertos com precisão é de 78% em falhas (1) e a taxa de falsos positivos é de 22%, enquanto seu recall é de 99% e a taxa de falsos negativos é de 1%.

Considerando o resultado apresentado pelo modelo e conhecendo o comportamento dos rolamentos após o período de análise, é possível mostrar qual a probabilidade de falha indicada para cada rolamento e separá-los em dois grupos: os que de fato falharam e outros rolamentos aleatórios.

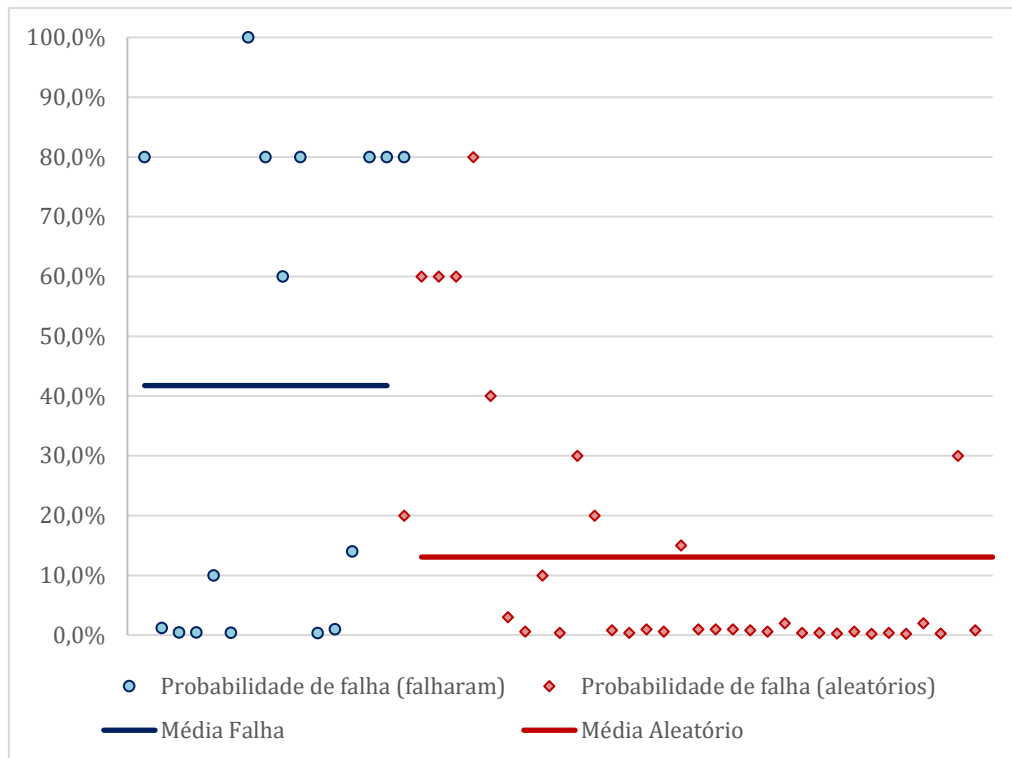


Figura 10. Resultado da base de validação do modelo

O resultado prático da modelagem mostra que, na média, o modelo tem 42% de chance de prever que um rolamento irá alarmar no ABD contra 13% de chance de indicar um “falso positivo”. Este resultado demonstra uma tendência de acerto do modelo e indica a possibilidade de evolução/refino dele. Entende-se também que 100% de acurácia do modelo é impraticável e não esperado uma vez que boa parte das falhas são oriundas de fatores externos, não tendo relação alguma com a série temporal imputada (dano interno por impacto – *Brinell*, por exemplo). Já para o índice de “falsos positivos”, também se entende que o horizonte analisado pode não ter sido suficiente ainda para validação da alta probabilidade de falha indicada.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Diante dos 4 casos apresentados foi possível identificar novas oportunidades de parâmetros/estratégias de manutenção, evitando eventos de rolamentos aquecidos e quase degola de manga de eixo, aumentando a disponibilidade e confiabilidade dos vagões, agindo sempre de forma preditiva otimizada sobre a evolução das falhas. Os resultados alcançados demonstram o sucesso das parametrizações baseadas no monitoramento acústico de rolamento, além de gerar ganhos operacionais de forma segura.

No caso 1 foi possível evitar 128 paradas forçadas de trens no ano de 2022 sem a geração de impactos na segurança operacional. Já no caso 2 não foi registrado eventos críticos em rolamentos após a criação do parâmetro. Por fim, o caso 3 teve como projeções realizadas nesse estudo um potencial de redução de 50% dos alarmes de rolamento aquecido na frota do *Heavy Haul*.

Outrossim, o caso 4 apresenta a evolução nos estudos de modelagem computacional para estudo da previsibilidade de falha ao longo do tempo. Isso permite uma visualização clara e intuitiva do desempenho do rolamento e da eficácia das previsões do modelo. Um ponto importante é de que alguns rolamentos aleatórios que

foram indicados com probabilidade alta de falha, também apresentam um histórico sugestivo de falha futura (reforçando a convergência do modelo). O resultado tem uma convergência bastante relevante para a finalidade proposta: indicar de forma preditiva rolamentos que irão falhar.

4. CONCLUSÃO

Conforme exposto, foi utilizada a metodologia de análises de eventos de falhas de rolamentos em vagões através de históricos de passagens dos ativos pelo equipamento de monitoramento acústico, a qual auxilia no gerenciamento do processo de manutenção preditiva.

Nem todas as falhas catastróficas de rolamentos podem ser previstas pela análise de ruído, mas este equipamento é essencial para operações de manutenção sustentáveis.

Através dessas metodologias conseguiu-se atribuir parâmetros de manutenção confiáveis, gerando assim maior disponibilidade e confiabilidade dos ativos, os quais são essenciais para atividades de operação, sem perda de segurança.

5. REFERÊNCIAS

1. CEMOZCELIK, I. Solving A Real World Data Science Tasks With Python: Predictive Maintenance Classification — Episode-I [Online]. Disponível em: <<https://medium.com/@i.cemozcelik/solving-a-real-world-data-science-tasks-with-python-predictive-maintenance-classification-a944dd9a4c9a>>. Acesso em: [10 outubro 2023].
2. FLEETONE. FleetONE User Manual.
3. ENGETELES. P-F Curve: What is it and how can we use it [Online]. Disponível em: <<https://engeteles.com.br/curva-pf/>>. Acesso em: [18 outubro 2023].
4. GitHub. Predictive maintenance research [Online]. Disponível em: <<https://github.com/topics/predictive-maintenance>>. Acesso em: [10 outubro 2023].
5. DATATONIC. Machine Learning for Predictive Maintenance – Part 1 [Online]. Disponível em: <<https://datatonic.com/insights/machine-learning-predictive-maintenance/>>. Acesso em: [10 outubro 2023].
6. DATATONIC. Machine Learning for Predictive Maintenance – Part 2: Predicting Hard Drive Failure [Online]. Disponível em: <<https://datatonic.com/insights/machine-learning-predictive-maintenance-hard-drive-failure/>>. Acesso em: [10 outubro 2023].

PARAMETERIZATION OF ACOUSTIC BEARING MONITOR ALARMS: FOUR CASE STUDIES

Abstract

The Acoustic Bearing Monitor (ABD) is a wayside capable of detecting bearing defects and warning about potential failures through acoustic noise analysis. With the information collected by the equipment in the field, it is possible to classify failures according to severity, defective component, and intensity of the signal generated. In this sense, the present work aims to present three practical applications built from analysis of data generated by ABD. Four characteristic situations were analyzed where the in-depth analysis of information from this equipment applies to gains in availability (1), security (2), reliability (3) and predictability (4).

Keywords: Waysides; Acoustic Bearing Monitor; Failure Analysis; Wagons; Bearing; Parameterization