



30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

CATEGORIA 3

Coleta de Dados Vibracionais para Manutenção Preditiva Automatizada no Sistema de Ventilação do Metrô-SP. Uma Quebra de Paradigmas na Integração do Sistema de Monitoramento de Ativos

INTRODUÇÃO

Os sistemas complexos são definidos como uma rede de componentes interconectados e interdependentes que, através de suas interações, produzem comportamentos coletivos que não podem ser simplesmente explicados pela soma das partes individuais, como define Mitchell (2009). Um sistema de transporte sobre trilhos, pode seguramente ser definido como complexo, pois é formado por uma grande diversidade de instalações e equipamentos, tais como trens, vias de rodagem, tuneis, estações de passageiros, subestações de energia,



30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA **11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS**

escadas rolantes, sistemas de proteção e detecção de incêndio, sistemas de ventilação, sistemas de arrecadação e outros. Cada um destes subsistemas pode também ser caracterizado como complexo. Assim, para manter a eficiência operacional de um sistema complexo, cada componente que a forma deve funcionar perfeitamente.

Portanto, a manutenção dos equipamentos é uma estratégia vital para a eficiência operacional de sistemas complexos, como o metrô de São Paulo. Esses sistemas requerem um monitoramento constante e preciso para garantir que todos os componentes funcionem de maneira otimizada e sem interrupções. Entre os vários sistemas que compõem a infraestrutura do metrô, o sistema de ventilação dos túneis e estações desempenha um papel crucial para garantir conforto térmico, ajudando no controle de temperatura e dispersão de partículas suspensas no ar nas estações e na segurança dos passageiros, pois, em caso de incêndios, direciona a fumaça para saídas estrategicamente posicionadas ao longo dos túneis. O porte dos ventiladores utilizados nesse sistema depende do tamanho das estações, de suas características construtivas e principalmente da quantidade de ar a ser renovado. Eles podem ser construídos de maneira horizontal ou vertical, a depender da arquitetura do local de instalação. A figura 1 mostra dois ventiladores modelo horizontal. A figura 2 mostra um modelo de ventilador vertical. Ambos os equipamentos estão instalados em estações de passageiros pertencentes a Companhia do Metropolitano de São Paulo – Metrô-SP

30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS



Figura 1 – Ventiladores horizontais.



Figura 2 – Ventilador vertical.

O mau funcionamento desses equipamentos pode resultar em imensos custos para a operadora do metrô, tanto materiais, devido à quebra de componentes como motores, rolamentos e pás, quanto imateriais, devido a insatisfação dos passageiros com a temperatura



30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

das estações. A detecção precoce de falhas nesses ventiladores é, portanto, essencial para a operação eficiente e segura do metrô.

De forma tradicional, a manutenção de um equipamento pode ser dividida em manutenção corretiva, reativa a quebra de algum componente do equipamento, e manutenção preventiva, onde partes do equipamento são substituídas com um intervalo determinado. Com a busca de um método mais eficaz de manutenção surge a manutenção preditiva, os componentes do equipamento são substituídos não mais com um intervalo definido, mas de acordo com sua eficiência operacional. Muitas técnicas podem ser utilizadas para ajudar no diagnóstico precoce de falhas em máquinas, normalmente envolvendo a análise das grandezas físicas que estão presentes nesse equipamento, como tensão e corrente elétricas, temperatura do motor elétrico, vibração do conjunto eletromecânico, análise de óleo, ultrassom, entre outras conforme pode ser visto em Mobley 2001.

Toda máquina rotativa apresenta uma série de comportamentos normais ao seu desempenho, como uma corrente elétrica definida, temperatura e vibrações que variam dentro de uma faixa determinada. Espera-se que uma vez instalados, esses comportamentos se mantenham estáveis ao longo do ciclo de vida operacional da máquina, pode-se dizer que esses dados compõem uma assinatura específica de cada máquina.



30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA **11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS**

Uma das técnicas mais empregadas para diagnosticar a saúde nesses equipamentos é a análise de vibração. Ela basicamente consiste em coletar dados vibracionais do conjunto em funcionamento e utilizando diferentes de técnicas, analisar esses sinais em sua forma temporal e seu espectro de frequências utilizando a transformada rápida de Fourier (FFT, do inglês *Fast Fourier Transform*). Assim, utilizando a técnica de análise se vibração, um especialista humano consegue diagnosticar potenciais falhas de desbalanceamento dos ventiladores, falhas de lubrificação, desgaste de engrenagens, desalinhamento entre o motor e as pás e rolamentos defeituosos.

Tradicionalmente, esses dados são coletados de forma manual pelas equipes de manutenção preditiva e enviados para análise. Esse modo de trabalho, embora eficaz, apresenta desafios significativos em termos de custo e logística, especialmente no contexto de uma infraestrutura metroferroviária extensa e complexa como a de São Paulo. As estações subterrâneas profundas e a distribuição geográfica dos ventiladores complicam ainda mais a coleta manual de dados, que demanda uma equipe dedicada e especializada, aumentando os custos operacionais.

Em resposta a esses desafios, o Metrô de São Paulo desenvolveu uma solução automatizada que revoluciona o processo de coleta e análise de dados vibracionais. Esta solução permite a coleta contínua e automática dos dados, transmitindo-os em tempo real para o sistema de monitoramento de ativos da companhia. Além disso, utiliza técnicas de inteligência artificial



30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

para realizar uma análise preliminar dos dados “in loco”, facilitando a identificação de anomalias e falhas em estágio inicial.

Este artigo apresenta uma visão detalhada da solução desenvolvida pelo Metrô-SP, destacando sua relevância, componentes principais e os benefícios proporcionados pela sua implementação. Ao integrar a coleta automatizada de dados com a análise baseada em inteligência artificial, a solução não só reduz os custos operacionais, mas também aumenta a eficiência e a confiabilidade do sistema de ventilação, garantindo um ambiente mais seguro e confortável para os passageiros.

ESTRUTURA DO ARTIGO

Na seção de diagnóstico, é explorada a importância da manutenção preditiva no contexto do sistema de ventilação do metrô e os desafios associados à coleta tradicional de dados vibracionais. Em seguida, descreve-se em detalhes a solução automatizada implementada pelo Metrô-SP, incluindo os componentes tecnológicos e o processo de integração ao sistema de monitoramento de ativos. Por fim, são apresentados os resultados e benefícios observados com a adoção dessa solução. Conclui-se o artigo com uma reflexão sobre as oportunidades de expansão e aprimoramento da solução, sugerindo possíveis áreas de pesquisa e desenvolvimento que podem contribuir para a evolução contínua da manutenção preditiva automatizada no setor de transporte sobre trilhos.



30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

DIAGNÓSTICO

Manutenção Preditiva e Seus Tipos

De acordo com Brito (2013), a manutenção pode ser categorizada em diferentes tipos, cada uma com seus próprios métodos e objetivos. Sendo que, suas principais categorias são:

1. **Manutenção Corretiva:** Realizada após a ocorrência de uma falha ou quebra do equipamento. É uma abordagem reativa, onde o reparo ou substituição do componente ocorre apenas quando o defeito já causou uma parada do sistema ou um desempenho inadequado. Embora seja necessária, essa forma de manutenção pode resultar em altos custos devido ao tempo de inatividade não planejada e danos secundários, tanto ao equipamento como aos utilizadores.
2. **Manutenção Preventiva:** Envolve a realização de inspeções, serviços e substituições programadas com base em intervalos de tempo ou uso específicos. O objetivo é evitar falhas antes que ocorram, mantendo os equipamentos em condições operacionais. Contudo, esta abordagem pode resultar em manutenção excessiva ou insuficiente, pois não leva em consideração a real condição do equipamento.
3. **Manutenção Preditiva:** Utiliza técnicas avançadas de monitoramento e diagnóstico para prever falhas antes que ocorram, permitindo intervenções direcionadas baseadas na condição real do equipamento. Essa abordagem busca otimizar o tempo de vida dos



30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA **11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS**

componentes e minimizar os custos operacionais, intervindo apenas quando necessário.

Relevância da Manutenção Preditiva no Sistema de Ventilação do Metrô-SP

No contexto do Metrô de São Paulo, e de toda indústria metroferroviária, que foi duramente atingida pela redução de passageiros pós pandemia, e conseqüentemente, a uma redução significativa das receitas, a busca por eficiência e eficácia é primordial.

Além disto, vivemos em uma era em que as informações trafegam de forma muito rápida. A falha em qualquer equipamento seja um elevador ou escada rolante parado, o atraso de um trem, a temperatura desagradável em uma estação, afeta a vida do passageiro e repercute imediatamente, tanto na mídia, como nas redes sociais, o que pode gerar grandes danos à imagem de companhia.

Assim, idealmente as manutenções dos equipamentos, que impactam diretamente a percepção do passageiro sobre a qualidade do serviço prestado, deve ser feita em um momento em que a operação comercial da empresa esteja paralisada. Em outras palavras, quando o passageiro não está nas estações ou nos trens.

Ocorre que para isso é necessário um grande investimento em manutenção, o que evidentemente, leva a um aumento dos custos envolvidos. Temos então um paradoxo, pois é



30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA **11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS**

necessário garantir a saúde do equipamento em um ambiente em que as receitas financeiras são menores.

Desta forma, a manutenção preditiva tem um papel primordial na saúde financeira e na imagem da companhia, pois é uma forma de manutenção que diminui os custos operacionais envolvidos. Através de dados históricos, ela tem o potencial de sinalizar o melhor momento para que a troca ou substituição de um equipamento, ou parte dele, seja executada em uma data e horário que não impacte na operação comercial da operadora.

Embora pouco visto pelos passageiros, a ventilação de estações e túneis é um dos componentes essenciais ao sistema complexo do Metrô de São Paulo. Como dito anteriormente, os ventiladores garantem o conforto térmico dos passageiros e a segurança em caso de incêndios, direcionando a fumaça para fora das áreas ocupadas. Portanto, a falha desses ventiladores pode causar não apenas desconforto, mas também graves riscos à segurança.

Via de regra, os ventiladores utilizados são de grande porte, podendo alcançar vários metros de diâmetro, estando sujeitos a desgastes e falhas em componentes críticos como motores, rolamentos e pás.

De acordo com Bloch (1997), A análise de vibração é uma técnica preditiva essencial utilizada para monitorar a condição de máquinas rotativas e detectar falhas potenciais antes que resultem em paradas não planejadas ou danos significativos. Essa técnica envolve a medição



30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

e análise das vibrações mecânicas geradas pelas máquinas durante sua operação. As vibrações são sinais valiosos que podem fornecer informações detalhadas sobre o estado de componentes como rolamentos, engrenagens, eixos e motores.

Princípios Básicos da Análise de Vibração

1. **Medição de Vibrações:** Sensores de vibração (acelerômetros) são instalados em pontos estratégicos da máquina para captar as vibrações mecânicas. Esses sensores convertem o movimento vibratório em sinais elétricos que podem ser analisados.
2. **Coleta de Dados:** Os dados de vibração são coletados ao longo do tempo, podendo ser registrados de forma contínua ou em intervalos regulares. Esses dados são normalmente representados como uma curva no domínio do tempo ou no domínio da frequência.

Análise no Domínio do Tempo e da Frequência:

- **Domínio do Tempo:** A análise no domínio do tempo examina a amplitude das vibrações ao longo do tempo. Pode identificar anomalias, mas é menos eficaz para identificar falhas específicas.
- **Domínio da Frequência:** A análise no domínio da frequência utiliza a Transformada de Fourier para converter o sinal de tempo em um espectro de frequências. Isso permite

30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

identificar componentes específicos de falha baseados em suas frequências características.

A transformada de Fourier

De acordo com Oppenheim (1999) a Transformada de Fourier é uma operação matemática que transforma um sinal do domínio do tempo para o domínio da frequência. Ela decompõe um sinal em suas componentes de frequência, permitindo analisar suas propriedades espectrais. Na figura 3 é mostrado um exemplo de um sinal X amostrado no tempo. Esse sinal é composto por uma onda senoidal com amplitude 5 e frequência de 60Hz, somada a uma outra com amplitude 2 e frequência de 270Hz e ainda um outro sinal que representa um ruído nesta amostra. Na figura 4 é mostrado o mesmo sinal após a aplicação da transformada de Fourier.

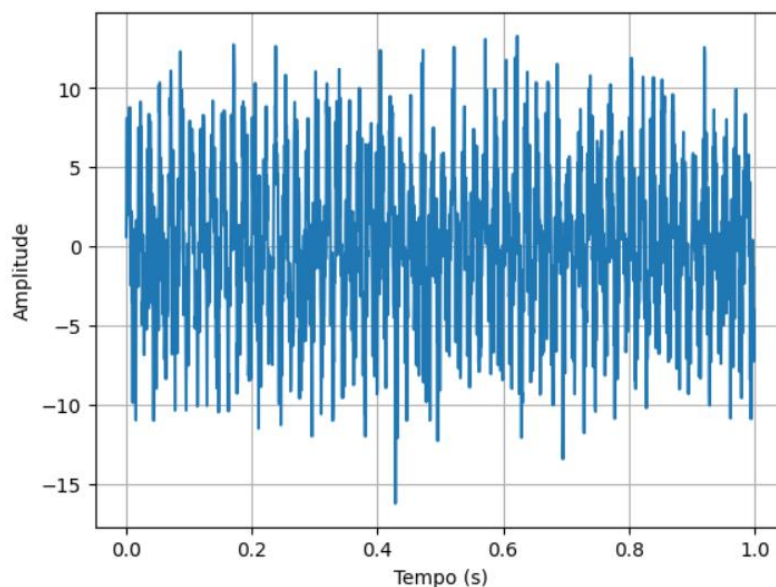


Figura 3 – Sinal X no domínio do tempo.

30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

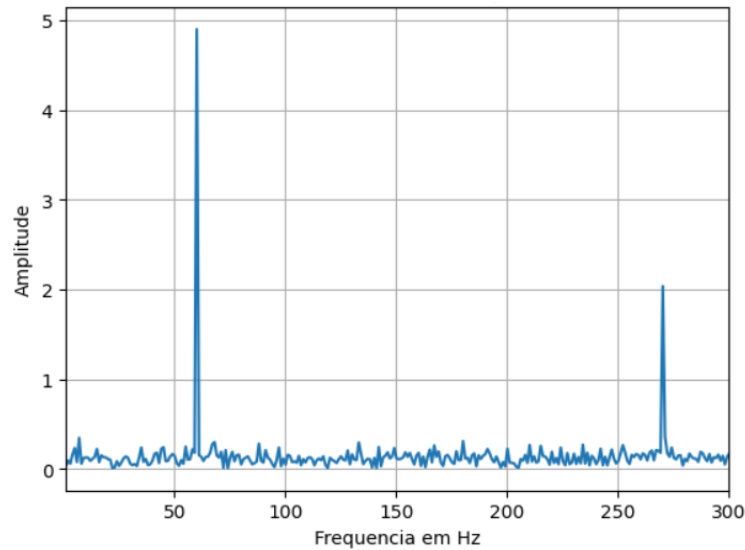


Figura 4 – Sinal X no domínio da frequência.

Transformada de Fourier Discreta (DFT): A DFT é a versão discreta da Transformada de Fourier, aplicada a sinais que são amostrados em intervalos discretos. A DFT é definida pela equação:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-\frac{i2\pi kn}{N}}$$

onde $x(n)$ é o sinal no domínio do tempo, $X(k)$ é o sinal no domínio da frequência, N é o número de amostras, k é o índice de frequência e i é a unidade imaginária.

Transformada Rápida de Fourier (FFT): A FFT é um algoritmo que reduz a complexidade computacional da DFT de $O(N^2)$ para $O(N \log N)$, onde N é o número de pontos de dados. Isso é especialmente importante para sinais com um grande número de amostras.



30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

Desafios da Coleta Tradicional de Dados Vibracionais

Para que a manutenção preventiva seja eficaz, é necessária uma grande quantidade de dados coletados dos equipamentos, pois ela dá-se principalmente pela comparação histórica dos mesmos. Ou seja, não existe manutenção preditiva com apenas uma amostra de dados. Idealmente quanto mais dados, melhor é o resultado das análises.

Porém, no paradigma tradicional de manutenção preditiva, a coleta dos dados vibracionais é feita de maneira manual. Ela envolve a presença de técnicos altamente especializados, que utilizam equipamentos de medição específicos para registrar as vibrações dos ventiladores em operação. Este processo não só é oneroso, mas também logisticamente complexo, o que pode dificultar que os dados sejam coletados na periodicidade ideal, especialmente devido às características únicas da infraestrutura metroferroviária, tais como:

- **Distribuição Geográfica:** Os ventiladores estão espalhados por várias estações e túneis ao longo de muitos quilômetros nas cidades, muitos dos quais em áreas de difícil acesso.
- **Ambientes Subterrâneos:** Muitas estações são profundas, dificultando ainda mais o acesso e aumentando o tempo e custo de deslocamento das equipes de manutenção.
- **Quantidades Elevadas de Equipamentos:** A grande quantidade de ventiladores requer monitoramento constante, tornando a periodicidade ideal de coleta de dados difícil de alcançar manualmente, devido aos custos envolvidos.



30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

Solução automatizada desenvolvida pelo Metrô-SP

Embora no ambiente industrial também sejam utilizadas máquinas rotativas, normalmente elas são concentradas em algum local específico da empresa. Estas, por maiores que sejam, diferem da indústria metroferroviária, pois seus ativos não estão espalhados por vários quilômetros de distância dentro das cidades.

Para monitorar essas máquinas, existem atualmente empresas que prometem automatizar a coleta de dados vibracionais dos equipamentos. Normalmente são utilizados sensores que captam os dados e os enviam, via internet, para uma central externa onde a análise é executada. E, periodicamente, é emitido um relatório informando as condições do equipamento.

É importante salientar que além dos aspectos geográficos destacados acima, nos sistemas metroferroviários, existe também a dificuldade de disponibilizar sinal de internet próximo aos equipamentos instalados, pois esse acesso externo pode ser um ponto de vulnerabilidade para que sejam executados ataques cibernéticos aos equipamentos.

Para superar esses desafios, o Metrô-SP desenvolveu internamente uma solução inovadora, que não só automatiza a coleta e análise de dados vibracionais, mas pode ser utilizada em diversos equipamentos e contextos da indústria metroferroviária (Cappellano et al., 2021). Sendo composto por diversos componentes tecnológicos que trabalham em conjunto para



30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA **11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS**

oferecer um monitoramento contínuo e em tempo real. Nesse trabalho, é apresentado a configuração utilizada para o monitoramento do sistema de ventilação.

Componentes do Sistema

Abaixo estão destacados os principais componentes do sistema:

Sensores de Vibração: Também chamados de acelerômetros, são instalados em pontos específicos nos ventiladores. O sensor coleta dados vibracionais continuamente, em três eixos distintos, fornecendo uma visão detalhada do funcionamento dos equipamentos. Este sensor foi desenvolvido internamente para conciliar as necessidades operacionais do monitoramento com a viabilidade financeira de instalação de milhares de sensores nos ventiladores. Ele pode ser visto na figura 5.

30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS



Figura 5 – Sensor de vibração.

Aquisitor de dados: Os dados coletados pelos sensores são enviados para um coletor inteligente, mostrado na figura 6, que os recebe, armazena-os localmente, faz uma análise preliminar dos mesmos e transmite um diagnóstico para a central de monitoramento em tempo real. Essa abordagem automática evita a necessidade de deslocamento das equipes de manutenção preventiva, reduzindo significativamente os custos operacionais. Além disso, a periodicidade de envio dos dados é muito maior, comparada com a coleta manual, o que permite um acompanhamento mais detalhado da saúde do equipamento.

30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

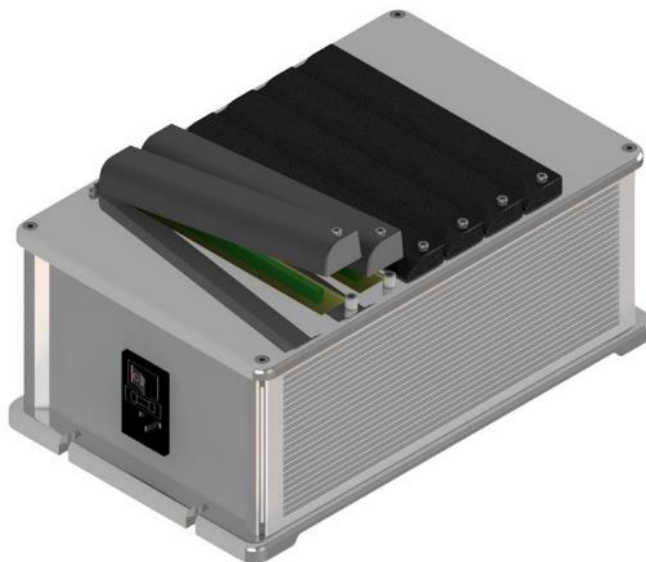


Figura 6 – Coletor de dados inteligente.

Inteligência Artificial: Algoritmos de inteligência artificial, desenvolvidos pela equipe de monitoramento, são utilizados para realizar uma análise preliminar dos dados "in loco". Ou seja, os dados já são analisados imediatamente após a coleta. Estes algoritmos podem detectar padrões e anomalias nas assinaturas vibracionais dos equipamentos, permitindo a identificação precoce de possíveis falhas. Também fornecem uma “previsão” da tendência da saúde geral do equipamento, permitindo uma melhor análise do desempenho do mesmo. Na figura 7 é mostrada a matriz de confusão do treinamento de um dos algoritmos inteligentes instalados no coletor de dados.

**30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA
11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS**

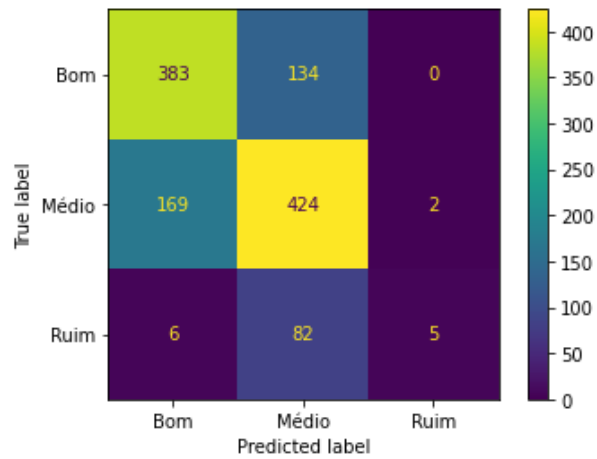


Figura 7 – Matrix de confusão de algoritmo de IA instalado no coletor de dados.

Centro de Controle da manutenção (CCM): Uma plataforma integrada onde os dados coletados e analisados pelo aquisitor de dados são centralizados. Nesse local, todos os alarmes e tendências de falhas dos equipamentos são mostrados e visualizados. Na figura 8 observa-se o CCM do Metrô -SP



Figura 8 – CCM Metrô-SP



30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

Benefícios da Solução Automatizada

A implantação da solução automatizada de coleta e interpretação dos dados, pode gerar inúmeros benefícios para a operação do sistema de ventilação do metrô destacando-se:

- **Redução de Custos Operacionais:** A coleta automatizada elimina a necessidade de deslocamento constante de equipes de manutenção, diminuindo os custos referentes a movimentação das equipes e contribuindo com a redução das emissões de gases de efeito estufa.
- **Aumento da Eficiência da Manutenção:** Com dados disponíveis em tempo real, é possível realizar intervenções mais precisas e oportunas, evitando falhas inesperadas e prolongando a vida útil dos componentes.
- **Melhoria da Confiabilidade dos Equipamentos:** A análise contínua e detalhada dos dados vibracionais permite uma detecção precoce de problemas, aumentando a confiabilidade e o desempenho dos ventiladores.
- **Integração com Sistemas de Monitoramento de Ativos:** A solução integrada facilita uma visão abrangente e consolidada do estado dos equipamentos, permitindo uma gestão e tomadas de decisão mais eficiente por parte dos gestores dos da manutenção.



30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

ANÁLISE DOS RESULTADOS

De acordo com Blank, (2003), uma das formas de testar e validar hipóteses de maneira eficiente, com o foco em aprendizado rápido e redução de desperdícios é o desenvolvimento de um Produto Mínimo Viável (MVP, do inglês *minimum viable product*). Por conceito um MVP é versão mais simples e funcional de um produto que permite a equipe de desenvolvimento coletar o máximo de aprendizado validado, com o menor esforço possível.

Desta forma, foi desenvolvido um MVP em dois ventiladores, um de cada tipo, nas estações Chácara Klabin (vertical), e Vila Mariana (horizontal). Nesse estudo os dados foram coletados cinco vezes ao dia por um período de vinte meses entre 2021 e 2022. Essas leituras geraram uma grande massa de dados que foi utilizada para o treinamento dos algoritmos de inteligência artificial IA que foram instalados no coletor de dados.

Funcionamento do coletor de dados inteligente

Os dados de vibração são transmitidos ao coletor através de dois sensores triaxiais instalados no motor e na carcaça dos ventiladores. Após isso o equipamento processa localmente os dados de aceleração, que estão em sua forma temporal, os converte em velocidade e realiza a FFT para separar as raias de frequência de interesse. Os dados das FFTs são novamente processados e normalizados para serem submetidos ao algoritmo de IA desenvolvido;

Após isto, é emitido um parecer probabilístico dos três possíveis estados do equipamento, bom, médio ou ruim. Aquele com o maior porcentual de probabilidade é a que o coletor

30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

assume como a mais provável. Os dados referentes a essas probabilidades e o estado definido são enviadas ao CCM para armazenamento e geração futura de alarmes. Também é emitida um parecer sobre o balanceamento do ventilador. A figura 9 mostra a tela desenvolvida para melhor visualização dos resultados obtidos, a tendência de evolução das probabilidades de falha e o estado geral da máquina.

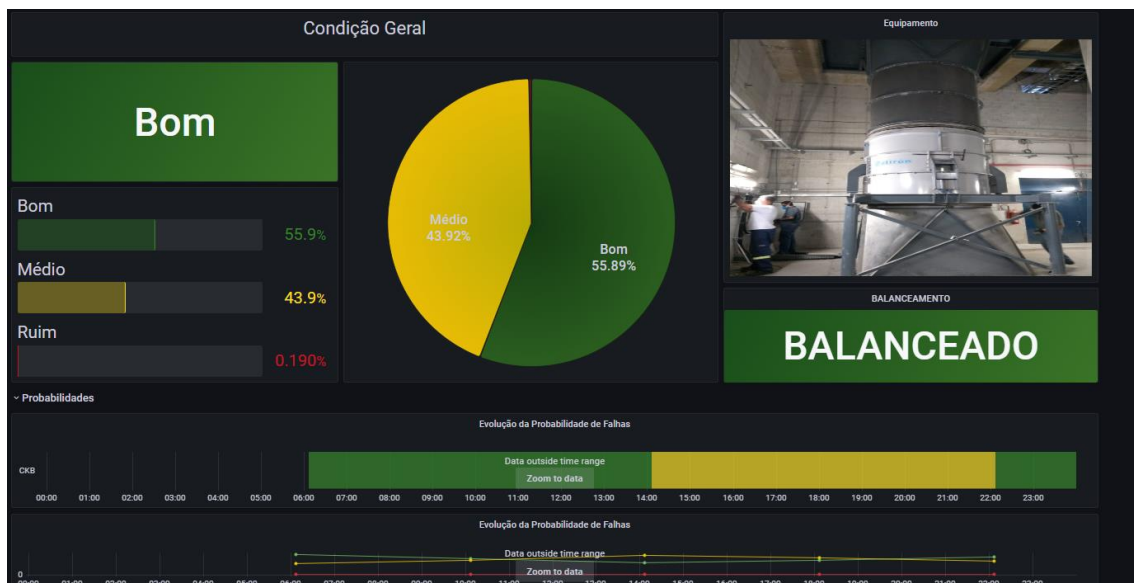


Figura 9 – Tela com a indicação da análise realizada de forma inteligente pelo coletor de dados.

Com o sucesso do MVP iniciou-se a implantação da instalação do sistema de monitoramento em todos os ventiladores do Metrô-SP. Devido a grande quantidade de equipamentos e a complexidade da infraestrutura necessária para o funcionamento do sistema, cerca de 30% dos equipamentos atualmente estão monitorados.

Porém já é possível observar uma série de melhorias operacionais. A coleta contínua e a análise automática dos dados vibracionais têm permitido uma manutenção mais proativa e



30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

eficiente, reduzindo significativamente as falhas não planejadas e os custos operacionais associados. Além disso, a satisfação dos passageiros com o conforto térmico nas estações tem se mantido alta, refletindo a eficácia do sistema de ventilação monitorado.

CONCLUSÕES

A solução automatizada desenvolvida pelo Metrô-SP representa um avanço significativo na manutenção preditiva dos sistemas de ventilação. A integração da coleta de dados automatizada com a análise baseada em inteligência artificial não só reduz custos, mas também aumenta a eficiência e a confiabilidade dos equipamentos. Esta abordagem pode servir como modelo para outras operadoras de metrôs e sistemas de transporte que enfrentam desafios semelhantes, apontando para um futuro em que a manutenção preditiva automatizada se torna uma norma na gestão de ativos críticos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Blank, S., O Manual do Fundador: Um Guia para Construir a Empresa de Sucesso, Bookman Editora, 2013.

Bloch, H. P., e Geitner, F. K., Machinery Failure Analysis and Troubleshooting: Practical Machinery Management for Process Plants, Gulf Professional Publishing, 1997.



30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

Cappellano, G., Alves, A. L., et al. “Dispositivo inteligente para coleta de grandezas físicas e sinais digitais de equipamentos metroferroviários”. Patente requerida BR 20 2021

0183859U. Depositante: Companhia do Metropolitano de São Paulo. Depósito 28/09/2021

Carneiro, G. B., “Manutenção: Funções e Organização”, Editora Blucher, 2001

Mitchell, M., “Complexity: A Guided Tour”, Oxford University Press, 2009.

Mobley, R. Keith., “Maintenance Fundamentals”, Butterworth-Heinemann, 2002.

Oppenheim, A. V., Schafer, R. W., e Buck, J.R., Discrete-Time Signal Processing. Prentice Hall, 1999.