

CATEGORIA 3

APLICAÇÃO DE MANUTENÇÃO BASEADA EM CONDIÇÃO PARA O MATERIAL RODANTE

AUTORES

INTRODUÇÃO

“Estude o passado se quiser decifrar o futuro.”

A citação acima dita pelo filósofo chinês Confúcio há mais de 2.000 anos atrás não poderia ser mais precisa nos dias modernos. O modo de vida das pessoas em todo o mundo muda rapidamente, enquanto o século XXI avança. Grandes empresas caem inesperadamente, os padrões de consumo mudam repentinamente, a tecnologia evolui rapidamente. Entender os dados históricos de qualquer negócio passa a ser essencial para planejar o futuro.

Neste cenário, as empresas de metrô lidam com os desafios de mover milhões de pessoas cumprindo rigorosos parâmetros de segurança e confiabilidade enquanto lidam com sistemas complexos que exigem altos esforços de manutenção.

Mesmo assim, o mundo em mudança oferece muitas oportunidades para as empresas que pretendem se aprimorar. As empresas de transporte podem encontrar boas

26ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 7º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS



soluções para alcançar o melhor uso dos dados históricos usando as novas tecnologias de digitalização (Big Data, gerenciamento de ativos, internet das coisas, aprendizado de máquina – “*machine learning*” – e os conceitos da chamada Indústria 4.0). Este é um cenário em mudança apresentado em muitos campos e o setor ferroviário precisa estar pronto para dar o próximo passo.

Para fazer isso, operadores metroferroviários devem se preparar e tomar decisões que garantam uma abordagem mais precisa e assertiva e que direcionem os procedimentos da empresa para melhorias, em vez de confusão e instabilidade nos funcionários da empresa.

Entre algumas das abordagens mais importantes deste trabalho, deve-se destacar que as empresas de transporte devem estruturar seu Gerenciamento de Ativos para aproveitar melhor o uso deles.

Para planejar o Gerenciamento de ativos, eles também devem se concentrar em estratégias que reduzirão os custos do ciclo de vida dos ativos (LCC, da sigla em inglês). Portanto, é muito importante planejar o ciclo de vida desde o início, mesmo antes da aquisição dos ativos, para que os requisitos possam ser melhor estabelecidos e os processos futuros relacionados ao uso dos ativos sejam melhor previstos.

Uma aplicação importante do gerenciamento de ativos nas empresas de transporte metroviário é o planejamento de manutenção do material rodante. Isso ocorre porque o estágio de manutenção é responsável por uma grande parte do custo total do ciclo de vida em um trem.

DIAGNÓSTICO

De acordo com o relatório (ABB, 2018), em abril de 2018, uma pesquisa envolvendo o setor de transporte mostrou que 72% das empresas responderam que planejavam implementar uma nova estratégia no sistema de manutenção de ativos nos próximos 1-5 anos, a fim de reduzir custos e melhorar sua gestão de ativos.

Nas práticas convencionais e mais conservadoras, as atividades de manutenção são executadas em um sistema chamado na literatura como Manutenção Baseada no Tempo (TBM, sigla em inglês) ou manutenção cíclica.

A manutenção baseada no tempo está relacionada às atividades de manutenção executadas com de forma periódica, pois são programadas de acordo com a periodicidade estabelecida pelo fabricante dos sistemas ou pelos usuários deles. Periodicamente, algumas atividades de reparo ou ajuste são realizadas para manter os sistemas funcionando corretamente. Essas atividades também são chamadas de manutenção preventiva e são realizadas sem que se tenha um conhecimento completo da real condição do sistema (ou componente) (ASHASI-SORKHABI, FONG, *et al.*, 2017).

Geralmente, o intervalo entre as intervenções de manutenção é baseado em conhecimento de especialistas, manuais de manutenção e relatórios dos fabricantes dos componentes sobre o uso do equipamento, sua vida útil e sua taxa média de deterioração (MAGRO, PINCETI, *et al.*, 2016)

26ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 7º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS



Juntamente com o TBM, também existem atividades chamadas de manutenção corretiva (ou atividades de reparo). Às vezes, também é chamado de manutenção "executada até a falha" (ou "run-to-failure", em inglês) na literatura, que é um nome muito esclarecedor para explicar a estratégia. As atividades de manutenção são executadas quando uma falha já ocorreu e é necessário gastar algum trabalho, material e dinheiro para fazer com que os sistemas danificados voltem a funcionar novamente. Outro nome usado para esse tipo de manutenção é manutenção reativa, que também é um nome muito óbvio, pois as intervenções são provocadas apenas em resposta às ocorrências apresentadas.

Embora a facilidade de programar intervenções de manutenção e de montar orçamentos com os custos anuais de manutenção, muitas desvantagens surgem com a necessidade de implementar manutenções preventivas e corretivas, como:

- Necessidade de reparo depois que a falha já ocorreu e todas as consequências de ter a falha já presente.
- Gerenciamento complicado devido às incertezas que envolvem o desgaste dos componentes e a periodicidade de manutenção.
- Os sistemas de controle do cronograma de manutenção às vezes podem ser caros.
- A manutenção preventiva força a substituição de alguns elementos, mesmo que eles não tenham atingido o fim da vida útil. Adicione a esse fator também os outros custos envolvidos na desmontagem, descarte e remontagem dos itens.

26ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA
7º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS



(CALABRESE, 2018) (MAGRO, PINCETI, *et al.*, 2016)

O problema principal da manutenção preventiva é estabelecer o cronograma das atividades mais importantes e necessárias ao mesmo tempo que insiste em atividades desnecessárias e, às vezes, até indesejadas, porque muita intervenção pode ser prejudicial ao bom funcionamento dos sistemas. Além disso, conforme afirmado por (MAGRO, PINCETI, *et al.*, 2016), a manutenção preventiva não é suficiente para evitar falhas e pode levar ainda a gastos desnecessários.

Para classificar as atividades necessárias, é importante entender os objetivos da organização e traçar um plano para alcançar o melhor Sistema de Gerenciamento de Ativos (FAIZ e EDIRISINGHE, 2009).

A área de estudos de Gerenciamento de Prognósticos e Estado (PHM, sigla em inglês) concentra-se no estado geral de integridade de máquinas ou sistemas complexos e suporta o processo de tomada de decisão para a manutenção desses sistemas. Geralmente envolve a detecção de falhas, diagnóstico e prognóstico de falhas e antecipação de problemas. A principal abordagem para esse modo de gerenciamento envolve estimar a vida útil restante (RUL) dos componentes, prever suas falhas e seus impactos no funcionamento geral dos sistemas (ATAMURADOV, MEDJAHHER, *et al.*, 2017).

De acordo com (MCKINSEY & COMPANY, 2017), aproximadamente 30% do tempo gasto pelos trens nos blocos de manutenção é usado para o diagnóstico manual de falhas.

Extremamente relacionado ao PHM, vem a manutenção preditiva ou, a que atualmente é melhor explorada, **Manutenção Baseada em Condição** (CBM, sigla em inglês). Para descrever brevemente a CBM, pode-se relacioná-la à manutenção suportada no monitoramento das condições dos sistemas (através de sensores, inspeções etc.) e na determinação de quais atividades devem ser realizadas para evitar falhas. Minimiza as paradas não planejadas do sistema, típicas da manutenção corretiva, enquanto reduz o número de atividades da manutenção preventiva planejada (ASHASI-SORKHABI, FONG, *et al.*, 2017).

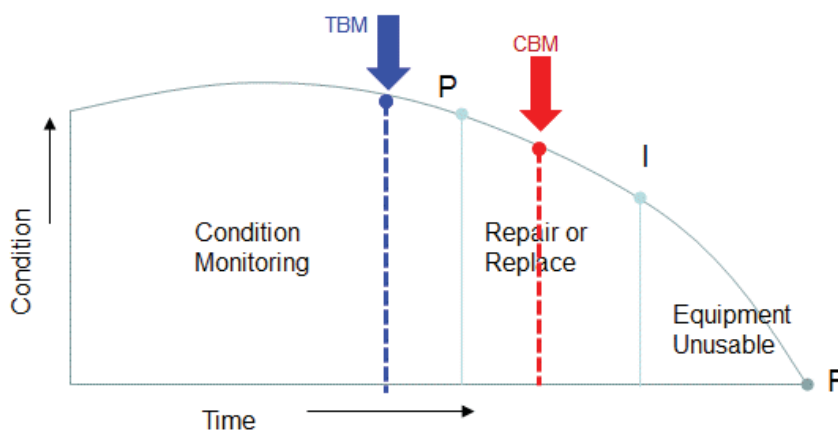


Figura 1 – Estratégias de manutenção de acordo com o estágio de deterioração dos componentes (LEE, LEE e KIM, 2016).

Observando a Figura 1, é fácil entender a diferença fundamental entre o TBM tradicional e o CBM moderno. O gráfico, usado por (LEE, LEE e KIM, 2016), demonstra o desempenho de um determinado sistema ou componente e como ele opera normalmente até atingir o ponto P (falha potencial). Após atingir a condição que pode representar uma falha em potencial, o desempenho diminui até o ponto I (falha

26ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 7º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS



iminente) e resulta na falha fatal no ponto F (falha fatal) quando ele finalmente para de funcionar.

O sistema de manutenção baseada no tempo (TBM) pretende provocar uma ação de reparo ou substituição antes de chegar ao ponto P, enquanto no sistema CBM, as atividades de reparo ou substituição são geralmente encontradas entre P e I. Isso ocorre porque a previsão do TBM é totalmente estimada com base no histórico de desempenho dos componentes, não possui nenhuma informação pontual sobre a condição real do sistema e não pode adiar o trabalho de reparo e arcar com o risco de falha. Por outro lado, o CBM é mais inteligente e pode incorrer em uma maior utilização dos ativos, pois trabalha com os dados atuais monitorados e é mais preciso sobre o ponto de falha.

Além disso, uma vez que a equipe já conhece o diagnóstico da falha ou pode antecipá-la, é possível separar as peças de reposição com antecedência e preparar a manutenção. Estima-se que a manutenção baseada em condições possa reduzir o diagnóstico manual em pelo menos 60% (MCKINSEY & COMPANY, 2017).

A adoção da manutenção baseada em condições tem o potencial de produzir grandes mudanças no planejamento de manutenção.

Em um esquema de manutenção baseado em condições totalmente automatizado, o cronograma e o gerenciamento das atividades de manutenção devem ser automatizados. Isso significa que uma tarefa de manutenção será gerada e entregue à oficina assim que for detectada uma falha em potencial de um trem ou equipamento em operação (MCKINSEY & COMPANY, 2017). É uma estrutura muito mais complexa,

26ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA
7º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS



com maior fluxo de comunicação pela empresa, mas que permite que as atividades sejam gerenciadas mais rapidamente e com mais precisão.

No entanto, uma vez que a implementação de uma manutenção baseada em condições totalmente automatizada não deve ocorrer de uma única vez. Provavelmente, as atribuições dos trabalhos de manutenção com base na análise e detecção de falhas executadas precisam ser divididas entre a engenharia de manutenção, que define as atividades a serem realizadas, e a oficina que lida com as tarefas de manutenção e a busca diária de diagnósticos.

Em 2019, o Metrô de São Paulo incorporou em sua equipe de manutenção um grupo exclusivo para analisar os dados de alguns sistemas de material rodante retirados de seus gravadores de eventos, a fim de procurar evidências de falhas antes que elas realmente ocorram.

A autoridade de transporte de Cingapura estabeleceu um programa para otimizar seus sistemas de manutenção de linhas ferroviárias, a fim de economizar custos, reduzir a poluição, reduzir o custo do ciclo de vida e aumentar a vida útil de seus ativos (GLOBAL MASS TRANSIT, 2018).

O Korea Railroad Research Institute, um instituto nacional do Ministério da Ciência e Planejamento Futuro da Coreia do Sul implementou um estudo para adotar uma estratégia CBM para material rodante, a fim de reduzir os custos de operação e manutenção e aumentar a segurança dos serviços, a confiabilidade e a disponibilidade dos veículos ferroviários urbanos (LEE, LEE e KIM, 2016). A expectativa dessa estratégia

26ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA
7º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS



é, segundo os autores, aumentar a disponibilidade em mais de 10% e reduzir o custo total do ciclo de vida em mais de 20%.

O metrô de Chongqing, na China, também está trabalhando no desenvolvimento de sua manutenção, a fim de incorporar tecnologias de monitoramento e análise de dados em seus procedimentos. O principal objetivo também é reduzir os custos e o tempo de inatividade do material rodante devido a falhas através da migração da manutenção com base no tempo para a manutenção com base na condição.

A Trenitalia, principal operadora ferroviária da Itália, começou a investir em um modelo de manutenção avançado, implantando uma solução da plataforma SAP HANA para analisar dados de sensores e monitorar o comportamento do equipamento remotamente e espera reduzir os custos de manutenção em cerca de 8% (SAP NEWS, 2016).

Ao mesmo tempo, os fabricantes de material rodante buscam maior diversificação de negócios, a fim de encontrar novas fontes de receita, uma vez que o mercado é cada vez mais competitivo. De acordo com (MCKINSEY & COMPANY, 2017), os dez principais fabricantes de material rodante aumentaram sua participação de mercado de 53% em 2010 para 71% em 2015. Portanto, a prestação de serviços como manutenção inteligente está no centro do radar de muitas empresas que costumavam estar mais preocupado apenas em fabricar e vender trens.

Nesse cenário, a manutenção baseada em condições representa uma ferramenta importante para fornecer aos fabricantes de trens a capacidade de fornecer os "modelos

de transporte como serviço" (ou "train-as-a-service"). A oportunidade aumenta à medida que o modelo de administração do transporte urbano muda para investidores financeiros que adquirem as operações, mas não têm capacidade para manter o material rodante.

MANUTENÇÃO BASEADA EM CONDIÇÃO (CBM)

O principal argumento para a aplicação de um sistema de gerenciamento de informações de ativos detalhado e integrado é que a precisão e as informações existem para serem acessadas por todos que possuam habilidades suficientes para analisá-las e interpretá-las (FAIZ e EDIRISINGHE, 2009). Enquanto, para o planejamento preventivo, a periodicidade é decidida principalmente com base no conhecimento de especialistas ou em observações empíricas e é gerenciada como planejamento reativo.

A ideia principal da filosofia CBM é detectar indícios de falhas nos estágios iniciais e impedir que elas aconteçam. Além disso, facilita estimar as taxas de falhas, encontrar a vida útil restante (RUL, siga em inglês), agendar manutenção preditiva, otimizar o inventário de peças de reposição, provisionar força de trabalho qualificada adequada, comparar diferentes estratégias para avaliação da confiabilidade (PALEM, 2013).

Para analisar os dados durante o monitoramento dos sistemas, os processos de prognóstico podem ser considerados online ou offline. Enquanto os processos on-line envolvem medições sendo feitas durante a operação do sistema simultaneamente com suas análises. A análise offline é usada após a operação do sistema com os dados coletados enquanto ainda estava em execução.

IMPLEMENTANDO CBM

Diversos estudos na literatura sugerem etapas semelhantes para facilitar a implementação do CBM em empresas que lidam com transporte sobre trilhos. Eles fornecem algumas diferenças entre si, mas o quadro proposto é basicamente o composto pelos cinco passos enunciados abaixo.

(RASTEGARI e BENGTTSSON, 2014), (MARTIN, DELLACASA, *et al.*, 2017), (LEE, LEE e KIM, 2016) (MAGRO, PINCETI, *et al.*, 2016) (ASHASI-SORKHABI, FONG, *et al.*, 2017) (ABB, 2018) (ATAMURADOV, MEDJAHHER, *et al.*, 2017)

1. Identifique os componentes críticos: para identificar os componentes e sistemas responsáveis pelo maior número de falhas e necessidades de manutenção.
2. Selecione os sensores adequados: para implementar um bom monitoramento de condições, é necessário escolher os melhores sensores de acordo com a aplicação. Deve ser confiável, preciso e de boa qualidade. Afinal, os efeitos do uso de um sensor inadequado podem ser piores do que não ter nenhum, pois podem gerar alarmes falsos ou até adicionar outro componente para falhar.
3. Remova ruídos dos dados: o pré-processamento dos dados brutos possibilita a remoção de ruído e a realização e análise com boa precisão e resultados precisos da avaliação de saúde.

4. Selecione a abordagem prognóstica e a avaliação da ferramenta: encontre o modelo adequado para a previsão de RUL dos sistemas e selecione uma ferramenta apropriada com base na avaliação que também use o conhecimento de especialistas.

5. Tomada de decisão: estabeleça a melhor decisão de manutenção com base nas informações da RUL, a fim de evitar novas falhas nos sistemas.

A sequência pode ser mais bem visualizada na Figura 2.

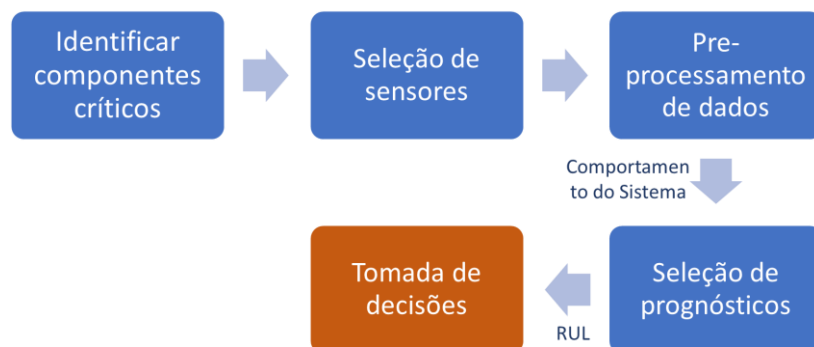


Figura 2 – Passos necessários para implantação de CBM.

Apesar das muitas vantagens esperadas pelo uso do CBM, (ABB, 2018) aponta muitas razões pelas quais as empresas e seus gerentes evitam a mudança e mantêm a manutenção baseada em tempo. Alguns deles entendem que é mais simples e fácil controlar um sistema construído com base no calendário e *check lists*. Além disso, a tecnologia necessária para implementar um sistema mais inteligente e complexo exige altos investimentos. Soma-se ainda que a manutenção é feita com base no agendamento há muito tempo e esta estratégia inspira algum conforto rotina cotidiana.

No entanto, o maior desafio é que os operadores são normalmente dotados de engenheiros muito inteligentes e experientes em tecnologias ferroviárias, mas que geralmente não têm amplo conhecimento sobre estudos de degradação ou as ferramentas analíticas necessárias para criar um CBM útil. Compreender o modo como os múltiplos sinais que vêm do sistema de monitoramento de trens funcionam e são armazenados é uma avaliação importante para analisar a integridade real dos ativos e prever futuras falhas (ABB, 2018).

Como foi possível perceber, o uso de dados não é trivial e exige que o acoplamento do conhecimento e da capacidade de análise de especialistas em engenharia ferroviária seja preciso. Principalmente porque para desenvolver modelos poderosos, são necessárias duas áreas do conhecimento. Portanto, o operador ferroviário atua na construção da análise de dados internamente ou compra a análise como serviço, mesmo assim, com o apoio de especialistas em ferrovias (MCKINSEY & COMPANY, 2017).

ANÁLISE DOS RESULTADOS

Um projeto piloto apropriado para o programa CBM é essencial para demonstrar os possíveis benefícios e a interconectividade entre diagnóstico e prognóstico que podem ser alcançados (ASHASI-SORKHABI, FONG, *et al.*, 2017).

O desafio inicial de implementar modificações no gerenciamento de ativos é entender que tipo de informação é necessária para as decisões que devem ser tomadas. Portanto,

26ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA
7º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS



os gestores de uma empresa devem ter em mente em que direção pretendem seguir e as etapas a serem alcançadas até lá e como se organizar para alcançar a estrutura necessária. Sem definição da direção correta, há um grande risco de fazer coisas desnecessárias ou criar soluções perfeitas para as perguntas erradas.

Portanto, se uma empresa pretende implementar o CBM para promover uma melhor gestão de ativos, deve primeiro analisar os aspectos organizacionais e os possíveis benefícios decorrentes dessa abordagem. Naturalmente, as projeções dos investimentos necessários e os benefícios carecem de informações confiáveis e precisas, mas devem ser abordadas estimando o custo da compra de equipamentos e instalação de monitoramento de condições, o custo de manutenção e tempo de inatividade e a implementação do retorno (RASTEGARI e BENGTTSSON, 2014).

Além disso, a organização deve realizar uma análise classificando os principais sistemas afetados, as principais falhas envolvidas e se as técnicas disponíveis possibilitam antecipar a detecção de falhas com precisão, a fim de evitá-las e prever adequadamente o RUL dos sistemas analisados.

A fim de propor a implementação de melhores técnicas de administração de ativos, este trabalho irá explorar o modelo de implementação de CBM em processos do Metrô de São Paulo. Assim, no desenvolvimento a seguir serão apresentadas etapas do modelo de implementação de CBM tal como proposto na Figura 2 já com as aplicações práticas em uma empresa real operadora de metrô.

Um desenvolvimento mais detalhado do modelo é apresentado na Figura 3.

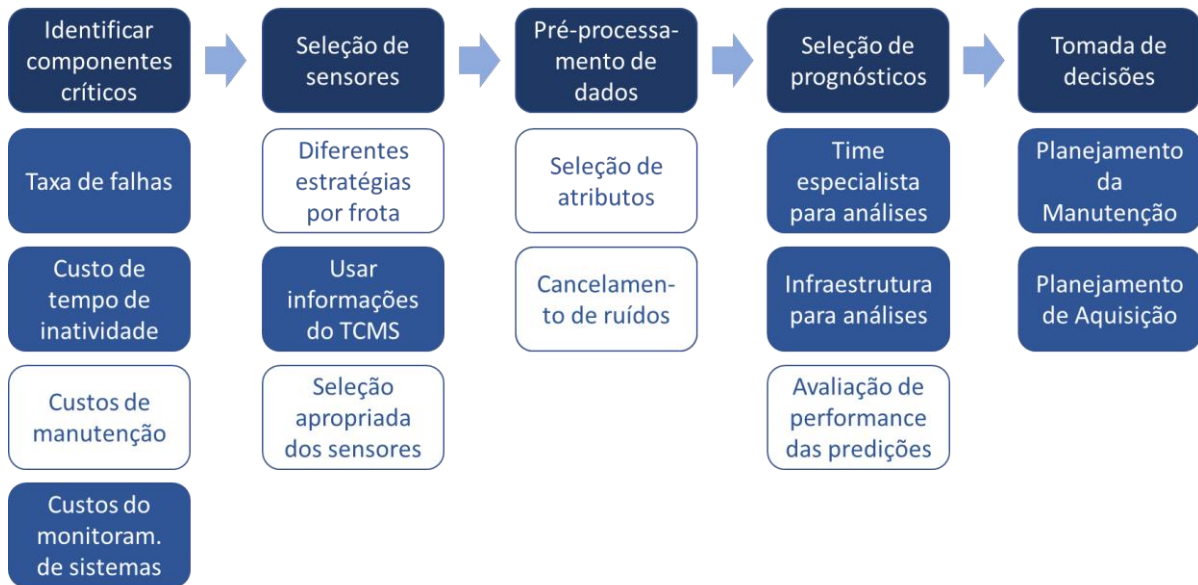


Figura 3 - Proposta de estrutura para implementação do CBM no Metrô de São Paulo.

Apesar da importância deles, os blocos não coloridos não serão explorados neste artigo.

IDENTIFICAÇÃO DE COMPONENTES CRÍTICOS

Para fazer uma análise melhor de onde começar, é necessário entender onde o problema atual está localizado. Descobrir os sistemas que têm maior impacto no serviço operacional em termos de falhas fornece um importante ponto de partida para concentrar o foco dos investimentos.

Se analisarmos as falhas que impactaram a operação do Metrô de São Paulo no último ano (2019), podemos encontrar facilmente os sistemas que representam os grandes vilões, como mostra a Figura 4.

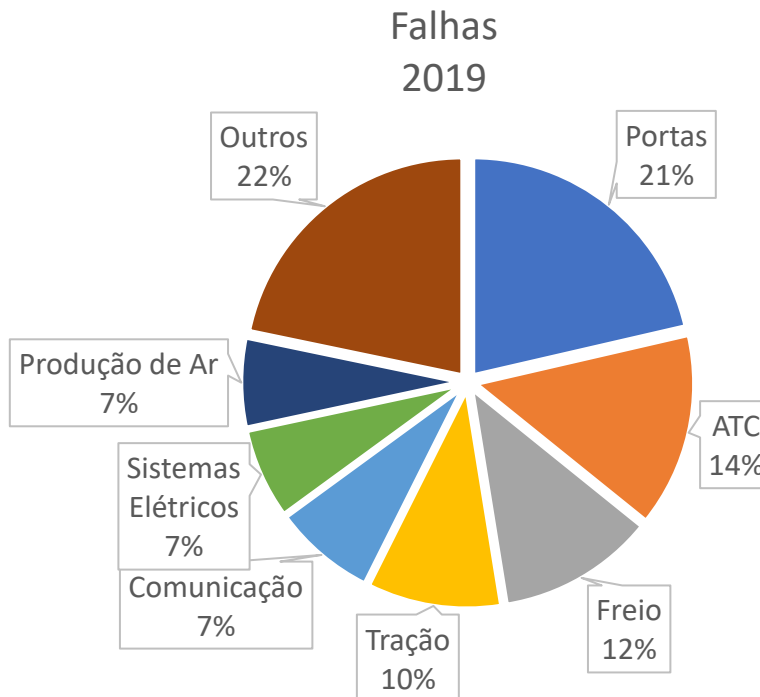


Figura 4 – Falhas que impactaram a operação comercial ao longo do ano de 2019.

É muito fácil perceber que quatro sistemas concentram mais da metade das falhas que impactaram o serviço de operação no Metrô de São Paulo. Eles são "Sistema de Portas", "Sistema de Sinalização ATC", "Sistema de Freio" e "Sistema de Tração".

O sistema de portas é responsável por mais de 1/5 das ocorrências durante o período analisado (2019) e o primeiro aspecto importante a considerar ao analisar as falhas desse sistema é que existem frotas trabalhando com atuação pneumática (E, I, L e K) e existem outras frotas com portas de acionamento elétrico (G, H e J) (SILVESTRE, 2014).

Falhas de portas estão concentradas nas portas pneumáticas

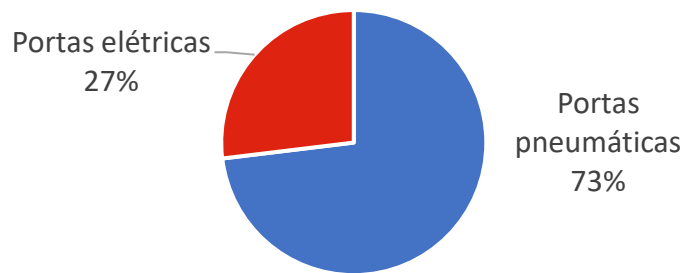


Figura 5 – Falhas de portas estão concentradas nas portas pneumáticas

Além disso, as falhas são divididas entre os componentes de controle, como unidades de controle de porta e sensores do tipo *micro-switches*, e os componentes de execução, como mangueiras, acionamentos de fuso, dispositivos de travamento e destravamento, motor e válvulas.

Ao analisar as falhas do sistema “Portas”, é interessante ressaltar que esse é o sistema que concentra maiores esforços da manutenção programada preventiva. Mesmo assim, ele continua concentrando um número maior de falhas.

Portanto, o sistema de portas pneumáticas é um dos principais sistemas que devem ser analisados para implementar práticas de gerenciamento de ativos. Isto envolve coletar os dados apropriados, estudando e analisando-os e propondo soluções.

A manutenção preventiva deve migrar para a manutenção baseada em condições nos componentes indicados de acordo com seu impacto no número de. A operação dos componentes deve ser monitorada adequadamente para coletar alguns dados e comparar com os limites estabelecidos para antecipar as falhas.

Além disso, como as portas elétricas não apresentam o mesmo nível de falhas, aparentemente é desejável uma modernização do sistema pneumático, migrando-as para o uso de componentes eletromecânicos em vez dos componentes acionados por ação pneumática. Isso é algo que um tomador de decisão poderia entender melhor após orientado pelas práticas corretas de gerenciamento de ativos.

Análises similares devem seguir com os sistemas de sinalização, tração e freio. Uma vez que estes, juntos com o sistema de portas, são os sistemas responsáveis pelo maior número de falhas dentro do período analisado.

CUSTOS DO MONITORAMENTO DE SISTEMAS

Uma parte importante da migração da manutenção atual para a mais eficiente é a revisão do plano de atividades referente à manutenção preventiva e corretiva.

As novas tarefas podem ser diretamente aplicáveis aos sensores e dispositivos já instalados ou podem ser usadas após algumas modificações nos trens, aquisições de dispositivos de monitoramento a serem usados a bordo ou monitoramento do trem pelo lado de fora (de vias, oficinas ou linhas do bloco de manutenção).

A análise preditiva pode ser usada medindo o tempo de abertura / fechamento das portas, usando câmeras para comparar as imagens coletadas em tempo real com imagens de modelos que indicam como os componentes deveriam estar, monitorando a vibração de equipamentos rotativos (como ventiladores, motores, etc.), monitorando sinais de diagnóstico e alertas de eventos para informar sempre que um componente

26ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 7º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS



ou sistema está prestes a falhar e muitas outras alternativas que suportam a substituição de tarefas executadas em uma base cíclica de tempo (TBM) para tarefas mais eficientes baseadas em condições (CBM).

Para analisar o cronograma de manutenção preventiva, o plano preventivo para uma frota pode ser usado como exemplo. Ao analisá-los individualmente, pode-se estimar que o tempo gasto em tarefas de manutenção preventiva poderia ser reduzido em até 50% se fossem feitos investimentos em novas ferramentas, dispositivos de monitoramento ou técnicas de algoritmos.

O tempo nas tarefas atuais de manutenção preventiva é gasto majoritariamente na manutenção do “Sistema de Portas” e dos “Truques”. No entanto, embora a maioria das tarefas das portas possa ser substituída por abordagens de CBM, os truques ainda precisam de uma grande quantidade de horas dispendidas em manutenção cíclica baseada em tempo (Figura 6).

Entre as atividades que podem ser substituídas, destacam-se:

- Testar o funcionamento adequado das portas em relação a vibrações, interferências, graxas, etc.
- Inspeções visuais de danos e rachaduras.
- Teste de motores, válvulas, dispositivos de travamento e destravamento de portas.
- Verificação da vibração dos ventiladores.
- Coleta de relatórios de falhas.

- Outras atividades que geralmente são executadas para evitar falhas futuras, mas podem ser substituídas pelas rotinas mais rápidas de monitoramento de condições.

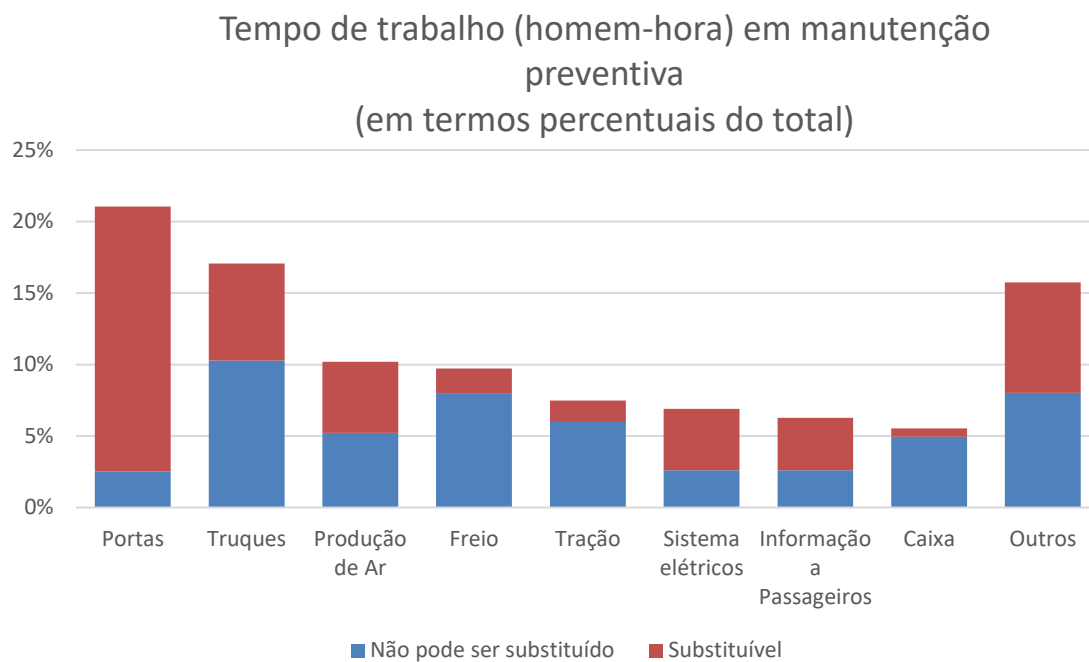


Figura 6 – Algumas das atividades de manutenção preventiva poderiam ser substituídas por CBM

Ao mesmo tempo, analisando as tarefas de manutenção preventiva que poderiam ser substituídas, mais de 50% delas poderiam ser realizadas sem a necessidade de adicionar novos sensores ou dispositivos de monitoramento (apenas com as variáveis e sinais que já estão disponíveis na rede ferroviária).

Tarefas baseadas em periodicidade poderiam ser substituídas através do monitoramento de vibração do motor, tempo de fechamento de portas ou outra

alternativa que possa monitorar as características dos sistemas para avaliar seu desempenho atual. Além disso, poderiam ser utilizados sistemas para comparar imagens capturadas de câmeras nos componentes que precisam de inspeção visual.

SELEÇÃO DE SENSORES

Quanto maior a idade e maior a heterogeneidade dos ativos, mais difícil é para o operador ferroviário alterar seus procedimentos e inovar seu sistema de manutenção. Mesmo envolver fabricantes de material rodante para contribuir com o processo se torna uma tarefa difícil (MCKINSEY & COMPANY, 2017).

Geralmente, a comunicação entre os sistemas que compõe um trem ocorre através do Sistema de Gerenciamento de Controle de Trem (TCMS) ou diretamente através das redes de controle distribuídas ao longo do trem.

Cada subsistema no trem possui uma unidade de controle dedicada que coleta dados para fins de controle ou para diagnóstico. Os dados, como temperaturas, níveis, posições e assim por diante, são transmitidos para o gerenciamento do veículo, que geralmente está concentrado no TCMS. Quando o TCMS detecta uma anomalia (de acordo com a lógica de controle desenvolvida para o sistema), gera um conjunto de dados de diagnóstico padronizado que contém todos os dados relevantes (MAGRO, PINCETI, *et al.*, 2016).

26ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 7º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS



Este conjunto de dados geralmente é armazenado em um banco de dados que contém os registros do trem durante sua operação. Além disso, algumas vezes o conjunto de dados também contém dados de processo e ambientais (como tensão da linha, temperatura da caixa de engrenagens, etc.) registrados durante os eventos. Além do histórico, também são registrados contadores de ocorrências específicas, como número de comutação de relés ou válvulas, quilômetros acumulados, etc. (MAGRO, PINCETI, *et al.*, 2016)

Então, vem a pergunta: como lidar com as diferenças entre as frotas? Como tratar os dados de trens que não têm sinais fluindo através de suas redes?

A resposta é muito simples. Antes de tudo, não é necessário implementar toda a alteração do sistema de manutenção desde o início. Os trens atuais já geram grandes quantidades de dados, que devem ser usados como uma etapa inicial para o monitoramento de condições. O aspecto principal, então, é coletar, armazenar e torná-los utilizáveis. Portanto, os investimentos adicionais estão no uso de registros de manutenção, na sua avaliação e na sua utilização para repensar o planejamento de manutenção (MCKINSEY & COMPANY, 2017).

No entanto, as variáveis que trafegam pelas redes possuem suas codificações específicas. A combinação específica de bits usados nas variáveis representa condições específicas enfrentadas pelo sistema que está sendo monitorado e permite a avaliação das condições de saúde dos sistemas. Portanto, para facilitar o uso desses dados na aplicação do CBM, é importante entender e ser capaz de ler as variáveis utilizadas.

Assim, aqui estão alguns outros aspectos importantes a serem considerados na implementação do CBM.

- É necessário ter uma lista de todas as variáveis usadas e quais condições elas usam para monitorar e ter acesso para decodificar as unidades variáveis usadas para entender os significados bit a bit.
- É importante trabalhar nos recursos de telecomunicações e no uso da rede Ethernet para permitir a transmissão de dados aos centros de análise por meio de comunicação terrestre, a fim de melhorar o CBM para uma operação on-line.

PRÉ-PROCESSAMENTO DE DADOS

O pré-processamento de dados está relacionado à limpeza dos dados coletados, excluindo erros e ruídos para análises posteriores. Além disso, é importante executar uma seleção de recursos para reduzir variáveis irrelevantes e redundantes que tornam a análise ainda mais difícil de lidar com tarefas desafiadoras. Quando há uma correlação muito forte entre dois recursos, por exemplo, um deles pode ser desnecessário e a quantidade de dados analisados pode ser reduzida. Ao mesmo tempo, quando algumas variáveis não têm relação com o problema analisado, ele serve como ruído puro e pode reduzir o desempenho da previsão (CHANDRASHEKAR e SAHIN, 2014).

SELEÇÃO DE PROGNÓSTICOS

Como acontece na maioria das empresas, o planejamento de manutenção do Metrô de São Paulo não é totalmente construído com base na manutenção baseada em tempo (TBM), nem com manutenção proativa baseada em condições (CBM). É uma mistura de iniciativas bem-sucedidas, com o objetivo de migrar para práticas mais novas e mais eficientes. Muitas soluções são baseadas em estudos de diagnóstico e prognóstico desenvolvidos por observação e experiências anteriores ou por testes proativos que incluem o monitoramento de sinais e a avaliação das condições dos componentes.

Nesse cenário, alguns aspectos importantes que envolvem a etapa de seleção prognóstica incluem o suporte desejado às ideias e pesquisas que se concentram em abordagens mais eficientes para lidar com a manutenção preditiva dos sistemas. Isso inclui aspectos humanos, aspectos de infraestrutura e avaliação de desempenho dos prognósticos.

A evolução das infraestruturas deve ser coordenada com a evolução paralela dos recursos humanos dedicados à manutenção. Portanto, ao evoluir nas etapas de manutenção, a empresa deve garantir que (MAGRO, PINCETI, *et al.*, 2016):

- Desde o início, as pessoas nas bases de manutenção têm acesso e podem adquirir os dados de que precisam.
- Há uma equipe dedicada para realizar a análise de dados off-line e propor as soluções para os problemas detectados.

26ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 7º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS



- Os especialistas se dedicam ao desenvolvimento de algoritmos avançados que serão executados automaticamente após a validação.

Tanto os operadores ferroviários quanto os fabricantes do material rodante precisam se organizar em relação ao conhecimento especializado em engenharia ferroviária e ao poder analítico para desenvolver modelos de análise eficientes (MCKINSEY & COMPANY, 2017).

Apoiada nessa ideia, a organização deve investir no desenvolvimento de recursos humanos internamente ou na contratação de conhecimento externo. As habilidades pretendidas envolvem:

- Análise de dados através de algoritmos.
- Processamento de sinal para tratar os dados.
- Experiência em sistemas de material circulante.

Dado o atual cenário de mudanças no mercado global de trens, é muito provável que a posse de dados se torne de extrema importância para lidar com uma manutenção moderna e mais eficiente. Por esse motivo, os operadores cuja equipe já possui o conhecimento técnico em tecnologia ferroviária, ao invés de temer a concorrência dos fabricantes do material rodante, devem aproveitar a oportunidade e melhorar seus procedimentos. Ao mesmo tempo, devem se preparar para oferecer o mesmo tipo de serviço para as outras empresas que possuem problemas semelhantes.

Portanto, uma empresa como o Metrô de São Paulo deve considerar o investimento no treinamento da equipe nas áreas ainda não cobertas, como análise de dados e

processamento de sinais ou trabalhar em conjunto com uma terceira empresa que possua esse conhecimento, mas não possui conhecimentos sobre ferrovias.

Uma recomendação válida de (MCKINSEY & COMPANY, 2017) é concentrar no mesmo espaço físico a equipe responsável pelo *know-how* de engenharia e análise, a fim de melhorar os resultados gerais. Algumas informações obtidas também podem fornecer informações para as avaliações de custo do ciclo de vida, suportando a otimização do planejamento ou modificações da frota nos componentes ou tecnologias dos sistemas.

Mas há ainda aspectos relacionados à infraestrutura de comunicação entre trens e base de manutenção. Para implementar uma abordagem inteligente para o gerenciamento de ativos, a infraestrutura é dividida entre os dispositivos de bordo (nos trens) e os externos, onde os dados são analisados e os algoritmos são elaborados e executados.

A infraestrutura de bordo é composta pelos sensores, unidades de controle, banco de dados e dispositivos de transmissão. Por outro lado, a parte externa é composta por sistemas que executam funções estatísticas e algoritmos CBM específicos para analisar os dados coletados dos trens (MAGRO, PINCETI, *et al.*, 2016).

As funções de dados e algoritmos de diagnóstico estão concentradas em uma infraestrutura centralizada externa que permite o controle dos seguintes recursos:

- monitoramento da frota.
- identificar e prevenir falhas e danos.
- geração de alarmes.

- extensos relatórios estatísticos

Ao mesmo tempo, a equipe de manutenção que analisa os dados precisa ter a capacidade de compartilhar dados em tempo real com a equipe de operação, a fim de reduzir as consequências de falhas como atrasos ou bloqueios na operação ferroviária.

Por esse motivo, a empresa precisa adaptar sua infraestrutura para garantir a comunicação e análise adequadas dos dados coletados. Para evoluir com cautela, a melhoria poderia ser feita em etapas separadas (MAGRO, PINCETI, *et al.*, 2016).

Em termos de infraestrutura, o primeiro passo, então, seria equipar todos os veículos com roteadores que permitissem a comunicação entre trens e a exportação de dados. Ao mesmo tempo, a infraestrutura fixa externa deve incluir um servidor da Web e uma interface para coletar dados do trem.

Nesta etapa, os dados de diagnóstico devem conter as informações relacionadas às falhas identificadas e o cenário ambiental e devem ser armazenados no banco de dados adequado que permita o compartilhamento posterior com os data centers.

Para os trens da frota “E”, que não possuem rede instalada, isso deve vir com a instalação de um banco de dados e um módulo de diagnóstico para poder armazenar os dados coletados e as condições ambientais no momento dos eventos registrados.

No início, a quantidade de informações deve considerar pelo menos:

- Número de identificação do veículo
- Data e hora do acionamento do sinal de diagnóstico

26ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 7º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS



- Nome do subsistema que gera a mensagem de diagnóstico
- Código da mensagem
- Tensão e corrente da linha

Essas primeiras etapas são suficientes para permitir que a capacidade prognóstica melhore da manutenção reativa baseada em tempo para a abordagem de monitoramento de condições.

Para evoluir para o próximo nível em que a equipe de manutenção antecipa as ocorrências de falhas na detecção de eventos com base em dados de diagnóstico validados, são necessárias outras etapas.

A segunda etapa é desenvolver as ferramentas de análise e padronizar os relatórios de manutenção, a fim de aproveitar melhor os dados no planejamento de manutenção. Conforme proposto em (MAGRO, PINCETI, *et al.*, 2016), uma visualização gráfica das variações de dados facilita aos especialistas detectar padrões periódicos e procurar correlações funcionais entre diferentes eventos. A fase de prognóstico é mais facilmente aprimorada com esse tipo de relatório, a fim de descobrir regras que, após um processo de validação, serão usadas para manutenção preditiva.

O método gráfico para relatórios e visualização de dados deve fornecer algumas vantagens, como:

- Análise das condições das variáveis durante um intervalo específico.
- Classificação das variáveis através de seu código.

- Cálculo de parâmetros baseados em tempo para um grupo de variáveis como número de horas trabalhadas, número de horas com velocidade > 3 km / h, etc.
- Cálculo das transições de ON para OFF em certos sinais e o número de horas em cada condição.
- Definição de outras estatísticas com base nos sinais ativos.

O terceiro e último passo considera algoritmos em tempo real para detectar operação anormal de sistemas e componentes e calcular seu RUL (tempo útil de vida remanescente). Em seguida, os alertas são enviados para as ferramentas de gerenciamento e as ordens de serviço e feedbacks são gerados automaticamente.

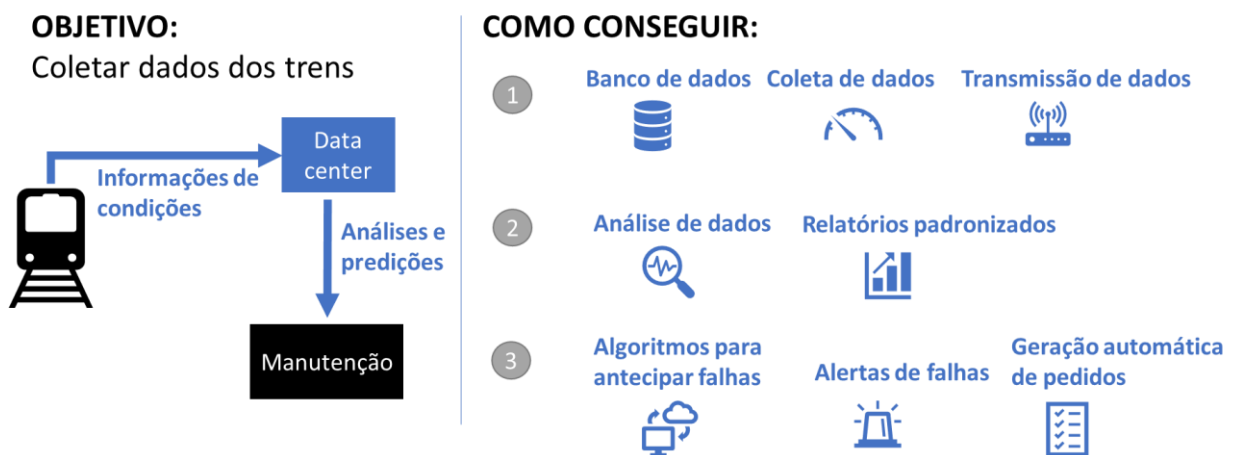


Figura 7 - Resumo das modificações necessárias na infraestrutura demonstradas em verde.

TOMADA DE DECISÕES

Finalmente, aqui vem as modificações de mais alto nível. Não porque são mais importantes que as outras, mas porque são tomadas em níveis fundamentais da organização que se relacionam com estruturas ou organização das equipes.

PLANEJAMENTO DA MANUTENÇÃO

A adoção de novas tecnologias e novas frotas equipadas com sensores requer algumas abordagens diferentes no planejamento de manutenção e operação, especialmente com a incorporação das perspectivas da CBM nas regras de decisão e nos requisitos regulatórios. À medida que o tempo passa, as ferramentas de análise evoluem e os processos e regras de decisão precisam ser adaptados (MCKINSEY & COMPANY, 2017).

A revisão periódica da conformidade regulatória e dos procedimentos para receber alertas de falhas precisa ser atualizada continuamente de acordo com os novos cenários visualizados por meio da abordagem de manutenção baseada em condições. À medida que o monitoramento da frota melhora, aumenta a oportunidade de adaptar continuamente as definições e o cronograma das atividades de manutenção (MCKINSEY & COMPANY, 2017).

(MAGRO, PINCETI, *et al.*, 2016) propuseram um “roteiro de manutenção” em quatro etapas para migrar das práticas atuais de manutenção para o CBM (Figura 8).

26ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA
7º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS



O trabalho ainda destaca que, à medida que as políticas de manutenção melhoram para etapas mais altas, há melhorias nos KPIs (principais indicadores de desempenho). (MAGRO, PINCETI, *et al.*, 2016).

Portanto, melhorando da manutenção reativa baseada em tempo para as práticas de monitoramento remoto, espera-se obter ganhos em índices de qualidade (segurança e pontualidade) e indicadores de manutenção, como tempo médio entre falhas (MTBF) ou tempo médio para reparo (MTTR) , uma vez que a manutenção ou substituição de componentes monitorados com comportamentos anormais pode ser adotada.

Da manutenção remota à proativa, a melhoria pode ser observada na disponibilidade e confiabilidade, já que detecções precoces ou observações em tempo real devem resultar em ações antecipadas.

Por fim, da manutenção proativa à preditiva, os diagnósticos em tempo real levam os tomadores de decisão a adotar apenas as ações necessárias e mais precisas para manter os ativos reduzindo o custo total do ciclo de vida (LCC).

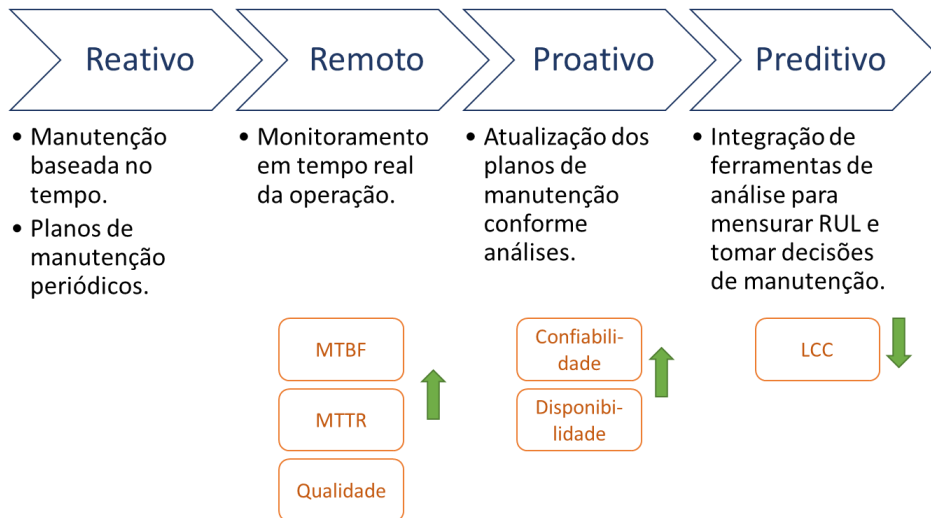


Figura 8 – Processo de evolução das práticas de manutenção. Adaptado de (MAGRO, PINCETI, et al., 2016)

Além disso, é importante adaptar o planejamento de manutenção para trabalhar de acordo com as novas práticas orientadas para a manutenção baseada em condições. Fornecer o fluxo adequado de informações e pedidos não é apenas necessário para garantir que os resultados esperados serão obtidos, mas também envolver a equipe de manutenção na mudança, mostrando que toda a empresa está comprometida com as modificações e os benefícios que ela deve proporcionar.

O planejamento de manutenção atual é um modelo muito comum, conforme demonstrado na Figura 9. A estrutura de manutenção atual comum é dividida entre uma equipe que determina as atividades a serem realizadas, outra assume as responsabilidades de agendar as tarefas de manutenção e a oficina que efetivamente executa as tarefas de manutenção.

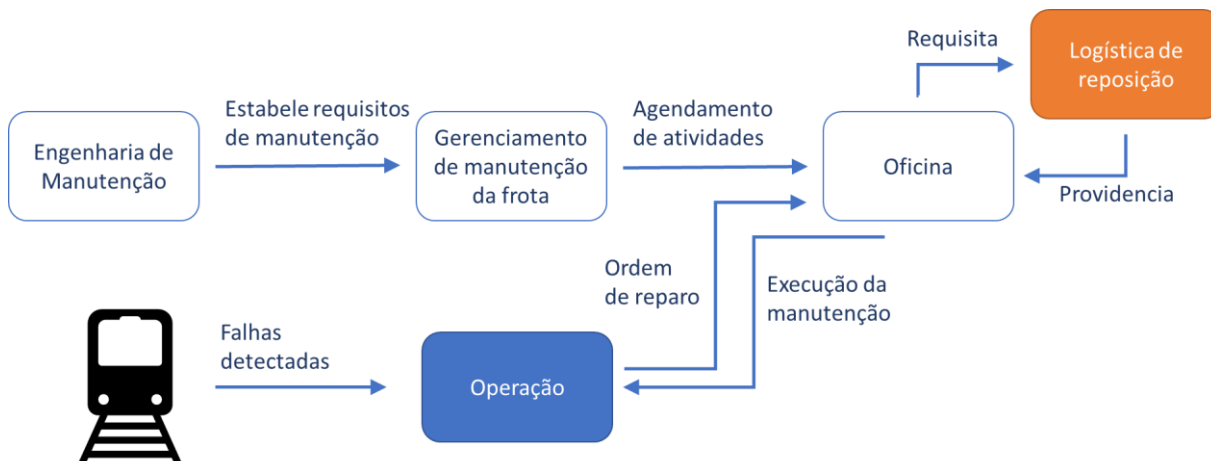


Figura 9 – Plano de manutenção atual no Metrô de São Paulo

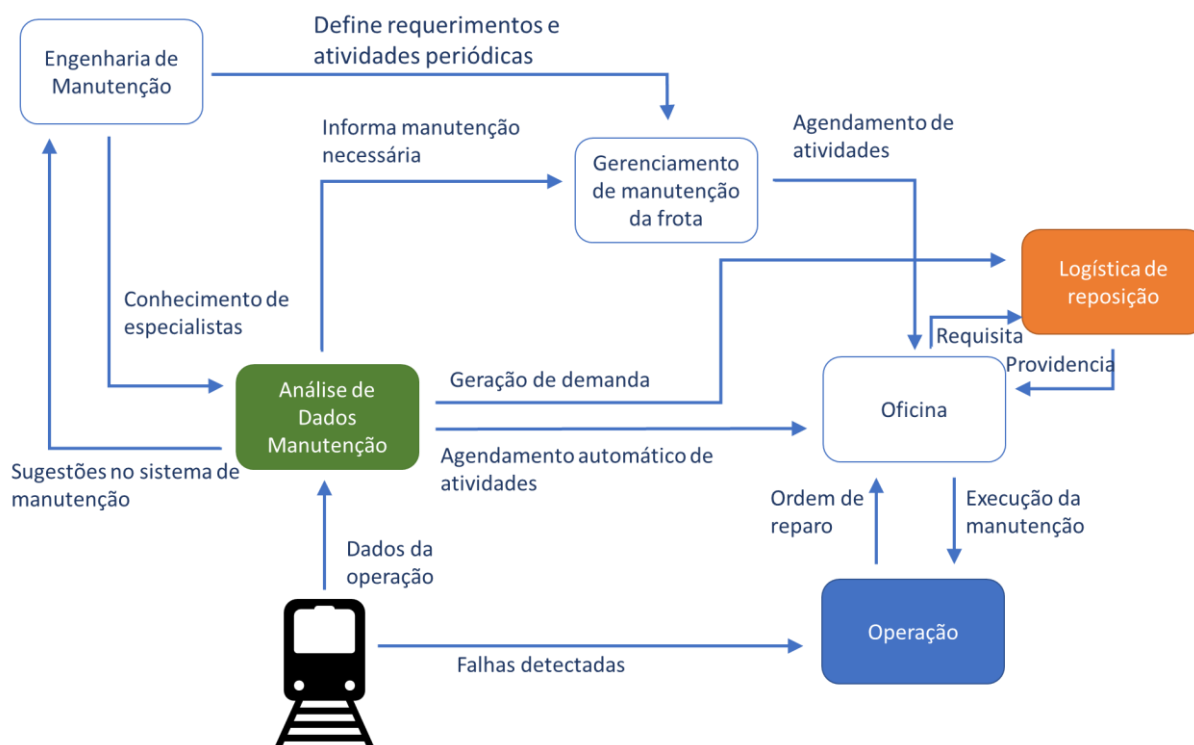


Figura 10 – Organização da manutenção replanejada.

A adoção de novas práticas vem com algumas mudanças na organização, como demonstrado na Figura 10. A proposta é muito mais completa. O fluxo de informações aumenta porque as informações são as ferramentas mais poderosas para gerenciar adequadamente os ativos. No entanto, muitas das atividades de monitoramento e análise de dados já são realizadas dentro dos blocos de “Engenharia de Manutenção” ou mesmo na “Oficina”.

Portanto, a maior mudança é apenas organizar o processo, dando mais poder à equipe de "Análise de Dados da Manutenção" e criando um canal específico para a melhoria automática, uma vez que alcança bons resultados em termos de previsão dos sistemas.

Na organização modificada proposta (Figura 10), o fluxo que ocorre atualmente continua existindo, mas as atividades agendadas seriam aprimoradas com a adição de alertas de iminência de falhas e pedidos gerados automaticamente ao "armazém de peças de reposição" proveniente da "Análise de Dados da Manutenção". Além disso, a "Engenharia de manutenção" recebe um suporte na previsão das condições dos componentes e está mais bem preparada para definir novos requisitos com base em informações confiáveis.

PLANEJAMENTO DE AQUISIÇÕES

A aquisição de material rodante, assim como a de todos os ativos, deve se concentrar no custo do ciclo de vida, ao invés dos custos iniciais. Definitivamente, não é uma tarefa fácil, pois os custos futuros são incertos, principalmente aqueles relacionados às etapas

26ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA
7º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS



de operação e descarte. No entanto, focar no custo total do ciclo de vida deve ser uma meta a ser perseguida.

No Brasil, empresas governamentais, como são a maioria das empresas de transporte urbano, são obrigadas pelas leis a seguir alguns procedimentos obrigatórios para realizar a compra que proporcionará maiores benefícios à administração pública.

Para atingir esses objetivos, a lei 8.666/93, emitida em 1993, estabeleceu o “menor preço” como o principal fator determinante para o que representa o melhor benefício, o que significa que, quando o Metrô de São Paulo pretende adquirir novos trens, o participante do processo de licitação que solicita o menor preço inicial deve sair vencedor da licitação. No entanto, isso pode implicar em custos iniciais mais baixos, mas custos futuros mais altos devido a requisitos de manutenção ou custos de inatividade causados por falhas.

Para tratar desse tipo de problema, emitido em 2016, a lei ordinária 13.303/16 atualizou esse conceito, incluindo “o maior retorno econômico” como um dos critérios a serem escolhidos pela administração pública, dando a oportunidade de focar nos melhores benefício a longo prazo ou no custo total do ciclo de vida, em vez do preço inicial.

Portanto, esse é o primeiro aspecto a ser implementado na aquisição de novos trens que devem ser adotados pelo Metrô de São Paulo: solicitação do menor custo total do ciclo de vida, em vez do menor preço de compra. Ele necessariamente forneceria não apenas o sistema mais barato no curto prazo, mas aqueles com melhores (e provavelmente menores) necessidades de manutenção.

Conforme observado no relatório de (MCKINSEY & COMPANY, 2017), o sucesso nas novas estratégias de manutenção depende muito de qual parte possui qual tipo de dados e o que é capaz de fazer com eles. O fato de os dados poderem ser acessados pelo operador ou por fabricantes pode determinar o nível de detalhe que cada um pode ter para abordar melhor a solução para os eventuais problemas.

Além disso, a adoção de melhores estratégias de manutenção depende muito das decisões tomadas durante a fase de concepção do material rodante. Portanto, para formular modificações futuras no gerenciamento de ativos, os operadores precisam selecionar soluções que se concentrem na arquitetura aberta e que não as prendam a certos limites de tipos de sensores ou formatos de dados (ABB, 2018).

Assim, os sensores podem ser facilmente adaptados, dando liberdade às organizações para selecionar processadores genéricos. Entretanto, nesse caso, o foco deve se basear nos algoritmos que processam os dados coletados e em qualquer atualização necessária que possa ser implementada no nível do software. Afinal, o gerenciamento de ativos continua mudando e um bom CBM deve estar pronto para incorporar as soluções e experiências mais recentes (ABB, 2018).

CONCLUSÕES

A implementação de uma abordagem mais inteligente em torno dos procedimentos de manutenção é altamente desejada. Essa abordagem mais inteligente

e confiável vem, na literatura, na forma das práticas conhecidas como manutenção preditiva, ou sua variação menos complexa, manutenção baseada em condições (CBM).

Apesar dos resultados promissores, a migração da manutenção tradicional periódica, ou manutenção baseada no tempo, para o CBM requer investimentos e esforços não apenas da equipe de manutenção, mas de toda a organização. Pode ser um grande desafio se não for realizado com uma preparação prévia e seguindo um plano organizado.

Resumindo as descobertas depois de estudar e entender os problemas básicos das práticas de manutenção na rotina dos operadores de transporte urbano, aqui está a lista de recomendações para implementar a CBM nos processos de material rodante do Metrô de São Paulo. Também pode ser adaptado a qualquer outro operador ferroviário com os ajustes necessários:

1. Encontre os principais sistemas e componentes para melhorar as práticas de manutenção.
2. Liste as variáveis úteis que circulam pelas redes de trens e saiba como decodificá-las para entender seu significado.
3. Crie a infraestrutura de comunicação para automatizar o fluxo de informações entre o centro de análise, engenharia de manutenção, oficinas, armazém de peças de reposição e equipe de operação.
4. Implemente alguns processos de treinamento na equipe de manutenção para separar e cancelar os ruídos dos dados coletados.

5. Crie um centro de análise de manutenção com profissionais especializados em tecnologias ferroviárias e em análise de dados. Forneça treinamento ou contrate o conhecimento necessário sobre tópicos relacionados à análise de dados.
6. Selecione as atividades de manutenção preventiva que podem ser substituídas por práticas de manutenção baseadas em condições com foco na redução de trabalho desnecessário e uma das atividades que tenham um impacto maior nas ocorrências da operação.
7. Inclua requisitos para a concepção e aquisição de sistemas a serem preparados para fornecer dados para Manutenção Baseada em Condição ou manutenção preditiva.

"Onde quer que vá, vá com todo seu coração."

-- Confúcio

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABB. **TAKING THE FIRST STEPS TOWARDS CONDITION-BASED MAINTENANCE.** [S.I.].

2018.

ASHASI-SORKHABI, A. et al. A Condition Based Maintenance Implementation for an Automated People Mover Gearbox. **INTERNATIONAL JOURNAL OF PROGNOSTICS AND HEALTH MANAGEMENT**, 2017.

ATAMURADOV, V. et al. Prognostics and Health Management for Maintenance Practitioners - Review, Implementation and Tools Evaluation. **International Journal of Prognostics and Health Management**, v. 8, p. 1-31, 2017.

CALABRESE, F. **Use of neural networks for the predictive maintenance of rolling stock**. Roma: Università Degli Studi di Roma La Sapienza. 2018.

CHANDRASHEKAR, G.; SAHIN, F. A survey on feature selection methods. **Computers and Electrical Engineering**, v. 40, p. 16 - 28, 2014.

FAIZ, R. B.; EDIRISINGHE, E. A. Decision Making for Predictive Maintenance in Asset Information Management. **Interdisciplinary Journal of Information, Knowledge, and Management**, v. 4, p. 23 - 36, 2009.

GLOBAL MASS TRANSIT. Singapore LTA's asset management strategies: Predictive maintenance by 2020, Singapore, 1 March 2018. Disponível em:
<<https://www.globalmasstransit.net/archive.php?id=29452>>. Acesso em: 04 October 2019.

LEE, K.; LEE, J.; KIM, I. **A study on strategy of condition based maintenance for Korea metro rolling stocks**. 7th IET Conference on Railway Condition Monitoring 2016 (RCM 2016). Birmingham, UK: [s.n.]. 2016.

MAGRO, M. C. et al. **Data Acquisition, Transmission, Collection and Analysis for a Fleet of Railway Vehicles in Search of Diagnostic Rules for CBM**. Milan, Italy: 14th IMEKO TC10 Workshop Technical Diagnostics. 2016.

26ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA
7º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS



MARTIN, A. D. et al. Integrated Health Monitoring for the actuation system of high-speed tilting trains. **International Journal of Prognostics and Health Management**, v. 8, 2017.

MCKINSEY & COMPANY. **The rail sector's changing maintenance game**. [S.l.]. 2017.

PALEM, G. Condition-based Maintenance for High-speed Fleet, September 2013.

Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/256990835_Condition-based_Maintenance_for_High-speed_Fleet>. Acesso em: 28 March 2020.

RASTEGARI, A.; BENGTTSSON, M. **Implementation of Condition Based Maintenance in Manufacturing Industry – A Pilot Case Study**. IEEE Conference on Prognostics and Health Management, PHM 2014. Cheney, USA: [s.n.]. 2014.

SAP NEWS. Trenitalia Showcases Railway Innovation with SAP, 2016. Disponível em: <<https://news.sap.com/2016/09/trenitalia-showcases-railway-innovation-with-sap/>>. Acesso em: 23 April 2020.

SILVESTRE, T. R. **Controle de segurança das redes internas ao material rodante do metrô de são paulo para garantir a circulação de trens**. Sao Paulo, Brazil: Centro Universitario FEI. 2014.