

5º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

CATEGORIA (3)

**ANÁLISE DE VIBRAÇÃO EM LOCOMOTIVAS: UTILIZAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO**

**NORMAL PARA DEFINIR OS LIMITES DE ALARMES DAS FREQUÊNCIAS**

**ESPECIFICAS DE FALHAS EM COMPONENTES ROTATIVOS DE LOCOMOTIVAS**

## INTRODUÇÃO

Entre as décadas de 80 e 90, durante a terceira geração da manutenção, surge os primeiros indícios de manutenção preditiva. Com uma visão diferente de outras modalidades de manutenção como a manutenções corretivas e preventivas, a preditiva tem como norte o acompanhamento sistemático dos ativos através de coletas de dados. A variação dos parâmetros ou condições de desempenho do equipamento define se é ou não viável realizar uma determinada intervenção no equipamento e qual o melhor momento para tal ação, reduzindo gastos desnecessário e aproveitando o rendimento máximo do componente.

Dentre as diversas técnicas aplicadas na manutenção preditiva tais como, termografia, análise de lubrificantes e ensaio por ultrassom, um dos métodos mais antigos de acompanhamento é a análise de vibração. Tal como em um eletrocardiograma que registra graficamente as oscilações elétricas que resultam da atividade do músculo cardíaco, a análise de vibração registra as condições de funcionamento de equipamentos ou componente rotativo, e através de parâmetros estabelecidos é definido se está correto ou não. Dentre os problemas que é possível identificar com essa técnica podemos citar como exemplo o desbalanceamento, desalinhamento, empenos, folgas, falhas em rolamentos e diversos outros problemas que podem comprometer o funcionamento correto do componente. Cada componente de um equipamento vibra de forma diferente e deixa uma impressão gráfica, na forma de um modelo linear, com a característica da falha correspondente.

No ramo ferroviário embora a análise de vibração não seja uma técnica tão difundida, nas locomotivas tem como objetivo monitorar componentes rotativos como, bobas d'água e óleo, turbo alimentadores, caixas multiplicadoras, geradores e ventiladores.

Ao longo do tempo em uma das empresas do segmento ferroviário diversos componentes, monitorados pela análise de vibração, avariaram e de acordo com os alarmes de funcionamento, até então seguidos, as análises não indicavam quaisquer problemas que necessitassem de intervenções da manutenção para serem corrigidos.

Com base em um vasto banco de dados coletados ao longo dos anos de funcionamento dos componentes rotativos de locomotivas, esse trabalho tem como objetivo determinar os

valores de alarme de uma determinada frequência de falha de um componente rotativo através de estudos estatísticos de distribuição normal.

## **DIAGNÓSTICO**

### **1. Análise de vibração**

Na análise de vibração as vibrações mecânicas de um determinado componente são captadas por um acelerômetro, componente composto por um cristal piezo-elétrico que é capaz de converter vibrações mecânicas em pulsos elétricos, que posteriormente são enviados para um coletor de dados e que por sua vez, os dados são transferidos para um banco de dados e analisados pelo profissional técnico através de softwares específicos.

Na análise dos dados, duas principais frentes são seguidas para determinar as condições de funcionamento do componente, a análise do espectro e valor global de vibração. O valor global de vibração determina a severidade da vibração causada pela avaria do componente (quanto maior o valor global de vibração mais crítico é o problema) e a análise do espectro define qual problema é com base na sua assinatura gráfica (como cada componente vibra em frequências diferentes, os problemas têm representações gráficas diferentes).



Figura 1 - Espectro de vibração

O valor global de vibração, indicado com um círculo na figura 1, é um valor numérico que determina a intensidade da vibração geral do componente, geralmente, segue como base de parâmetro para condenação ou intervenção no componente normas técnicas com base na classe do equipamento, levando em conta fatores como, por exemplo, sua potência e base no qual o componente é instalado (figura 2).

VIBRATION SEVERITY PER ISO 10816					
Machine		Class I small machines	Class II medium machines	Class III large rigid foundation	Class IV large soft foundation
		in/s	mm/s		
Vibration Velocity Vrms	0.01	0.28			
	0.02	0.45			
	0.03	0.71		good	
	0.04	1.12			
	0.07	1.80			
	0.11	2.80		satisfactory	
	0.18	4.50			
	0.28	7.10		unsatisfactory	
	0.44	11.2			
	0.70	18.0			
0.71	28.0		unacceptable		
1.10	45.0				

Figura 2- ISO10816

A assinatura espectral, figura 3, do componente nos mostra quais frequências estão em destaque no gráfico. Como cada frequência é responsável por um determinado problema no

equipamento, saberemos graficamente qual o problema que faz o valor global de vibração ser alterado e combinado as duas frentes de análise é indicado quando uma determinada intervenção será realizada e quais os componentes do equipamento devem ser analisados.

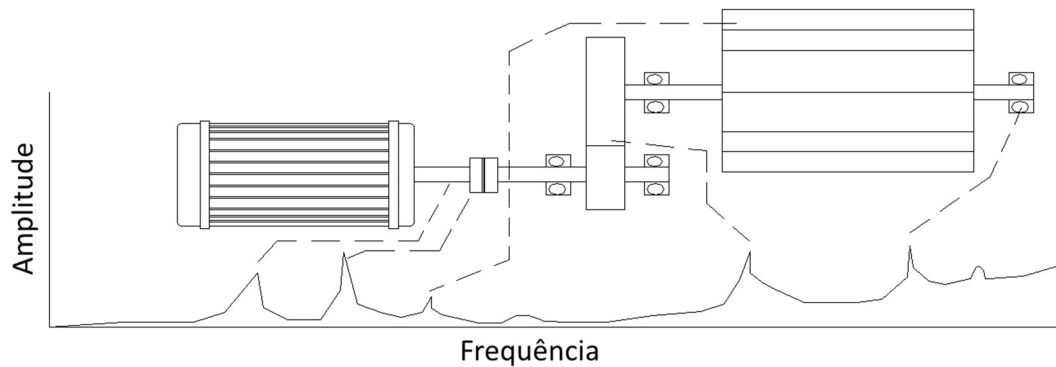


Figura 3 - Assinatura espectral

Diferente de alguns equipamentos industriais em que a análise de vibração é aplicada e os conjuntos de componentes que compõem o equipamento está distribuída de forma isolada, na locomotiva os componentes são instalados de forma agrupada posicionados em uma mesma estrutura. Com isso o valor global de vibração de um determinado componente é influenciado por outro.

## 2. Locomotiva diesel elétrica

Uma locomotiva diesel elétrica é um veículo utilizado para rebocar grandes cargas que utiliza um motor diesel como fonte primária de energia, acoplado a um gerador de energia elétrica que alimenta os motores elétricos de tração e através de um conjunto de engrenagens, o esforço mecânico produzido pelos motores de tração é transmitido as rodas acopladas aos eixos da locomotiva.



Figura 4 - Locomotiva diesel elétrica

### 3. Identificação do problema

Durante os anos de 2016 e 2017, como mostra na figura 5, diversas locomotivas foram rebocadas devido a avaria em um dos seus componentes. Um reboque da locomotiva é definido quando a mesma não tem a capacidade de tracionar e exercer sua função primária e deve ser retirada de circulação e retida em oficina para corrigir o problema. Todos os componentes avariados no período analisado são itens monitorados pela análise de vibração e de acordo com a análise do valor global de vibração associada a análise espectral não mostrava nenhum gatilho para gerar uma demanda de intervenção no componente para corrigir uma anomalia existente prevendo a sua quebra e evitando o reboque do ativo.

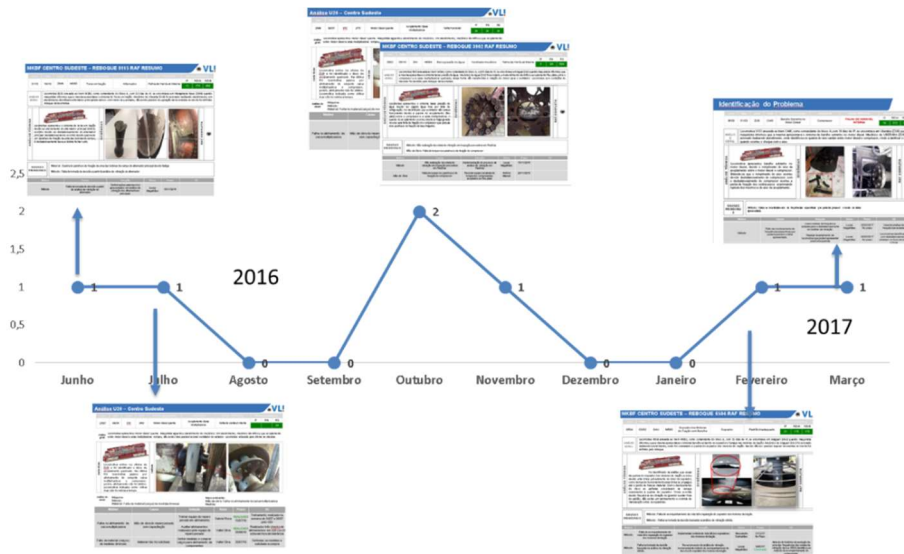


Figura 5 - Locomotivas rebocadas no período de junho de 2016 a março de 2017

Como exemplo, em março de 2017 a locomotiva 8133 apresentou barulho estranho no compressor, devido ao rompimento do eixo de acoplamento entre o motor diesel e compressor. Entende-se que o rompimento do eixo ocorreu devido desbalanceamento do compressor, com o desbalanceamento do compressor ocorreu a perda de fixação dos contrapesos ocasionando ruptura dos mesmos e do eixo de acoplamento (figura 6).



Figura 6 - Quebra do compressor da locomotiva 8133

Na última análise de vibração da Locomotiva 8133, realizada no dia 08/02/17, indicava o valor de 4,4mm/s no nível global de vibração para o compressor. De acordo com a tabela de tolerâncias, levando em consideração a potência do equipamento, o valor global estaria dentro da tolerância não indicando uma avaria do componente com base nesse parâmetro (figura 7).

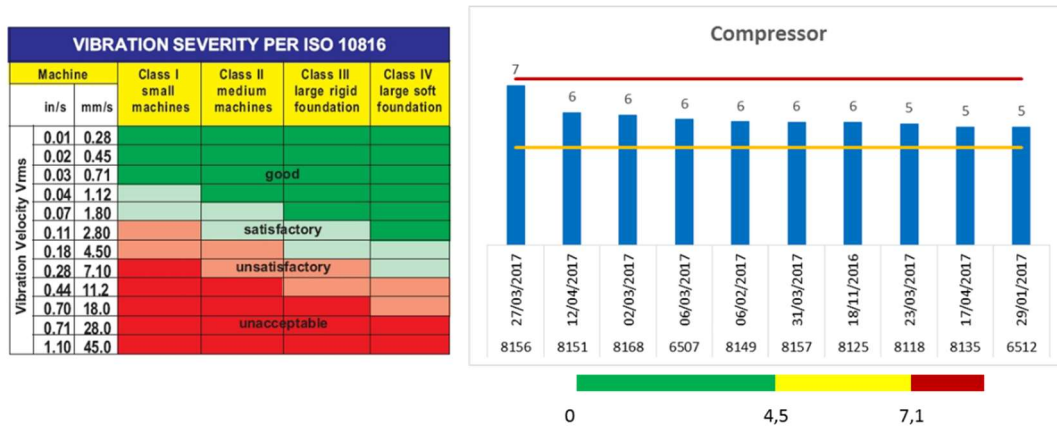


Figura 7 - Compressores de locomotivas com maior amplitude de vibração - 10 mais críticos  
 Como foi mostrado no exemplo e no histórico de eventos acima, a análise não se mostrou eficaz, da forma como até então é realizada, para evitar as avarias ao longo do período analisado. Com isso surgiu a necessidade de realizar uma abordagem diferente para identificar os desvios nos dados gerados pela análise de vibração.

#### 4. Solução proposta

Como vimos no tópico 1 desse artigo, a análise espectral nos mostra as amplitudes correspondentes a cada tipo de falha do componente. Tomando como base essa premissa deixaremos de olhar o valor global de vibração, valor que representa uma medida geral de



sua vibração, e passaremos a analisar cada frequência de forma individual. Dessa forma cada item terá seu peso individual no valor global de vibração.

Para realizar a solução proposta o estudo foi dividido em 3 etapas e para entender melhor como o estudo foi realizado, abaixo segue as etapas do projeto aplicado ao turboalimentador da frota SD40.



Figura 8 - Turbo alimentador da frota SD4

O Turbocompressor, também conhecido como turbo ou turbocharger, é um equipamento adicionado aos motores de combustão interna que aproveita os gases de escape para injetar ar nos cilindros (câmara de combustão).

#### 4.1. Etapa 1 do projeto - Mapeamento das frequências de falhas

A primeira etapa foi levantar as frequências de falhas correspondentes de cada componente interno do equipamento monitorado. A importância dessa etapa se deve a necessidade de conhecer cada item do equipamento para saber no espectro em que lugar cada falha deve aparecer. As frequências indicadas no gráfico levam em consideração a rotação do equipamento, o número de dentes de uma engrenagem, tipo de mancal, número de aletas, entre outros componentes internos (figura 9).

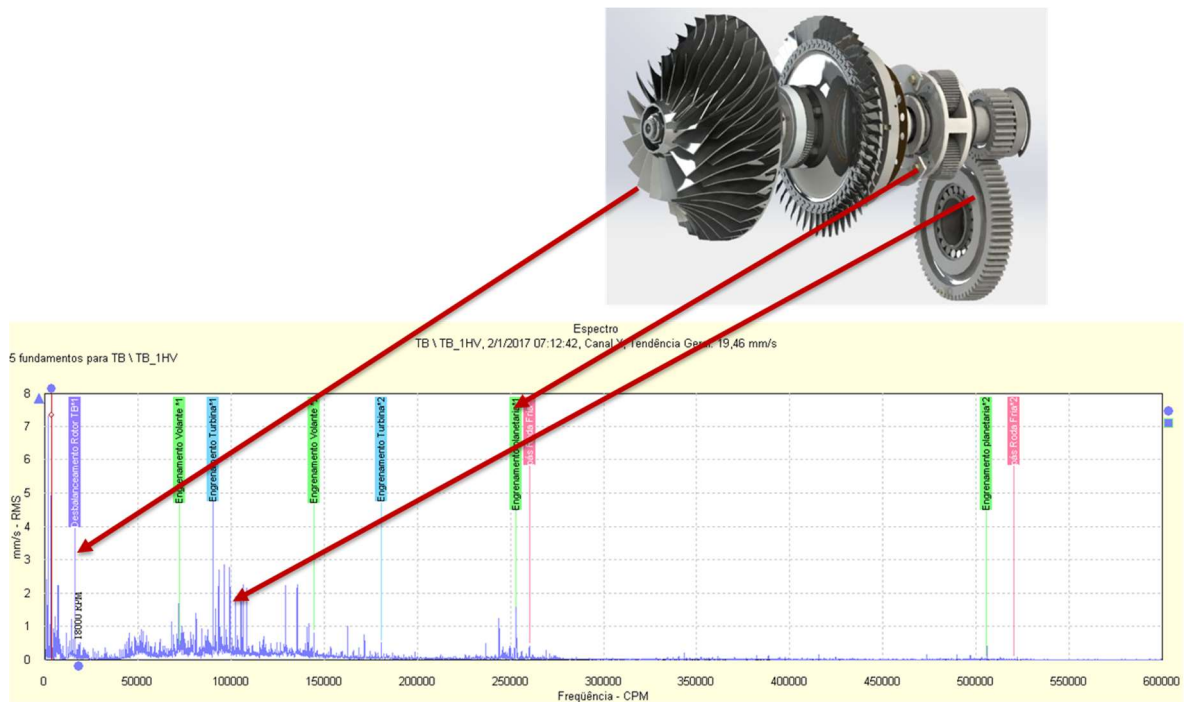


Figura 9 - Etapa 1 - Mapeamento das frequências de falhas

#### 4.2. Etapa 2 do projeto - Estudo de dispersão

Nessa etapa do projeto os dados dos espectros de vibração foram retirados do banco de dados do software de análise e transferidos para um novo banco. Nessa nova plataforma foi possível sobrepor os gráficos de todas as coletas realizadas do turbo alimentador e através do gráfico de dispersão foi possível identificar os agrupamentos de falhas de forma distinta.

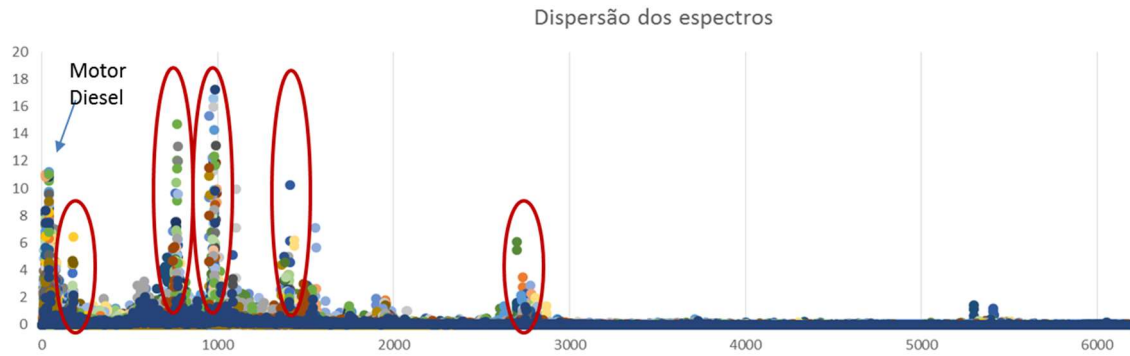


Figura 10 - Gráfico de dispersão

No exemplo acima, cada ponto no gráfico de dispersão representa o valor de pico em cada frequência de falha do componente analisado em uma determinada frota de 45 locomotivas ao longo de 2 anos de coleta. O intervalo de coleta de vibração para cada locomotiva é de 90 dias, ou seja, cada locomotiva realiza, em média, a coleta de dados de vibração 4 vezes por ano totalizando um bando de dados de 350 espectros dos quais 240 foram utilizados para realizar o estudo do turbo alimentador.

Também nessa etapa, para cada faixa de frequência mostrada no gráfico de dispersão as frequências de início e fim foram anotadas e o valor de pico de cada uma foi extraído. Com os valores de pico de cada frequência de falha extraído foi dado início a terceira etapa do projeto.

4.3 Etapa 3 do projeto – Estudo da distribuição normal dos valores de pico das frequências isoladas.

Após retirar os valores de pico de cada faixa de frequência indicada no gráfico de dispersão, os dados foram trabalhados no histograma de curva normal. Em probabilidade e estatística, a distribuição normal é uma das distribuições de probabilidade mais utilizadas para modelar

fenômenos naturais. Na figura 11 o eixo Y corresponde a frequência de repetição dos valores em uma determinada faixa, o eixo X corresponde a amplitude de vibração (valores de picos retirados do gráfico de dispersão).

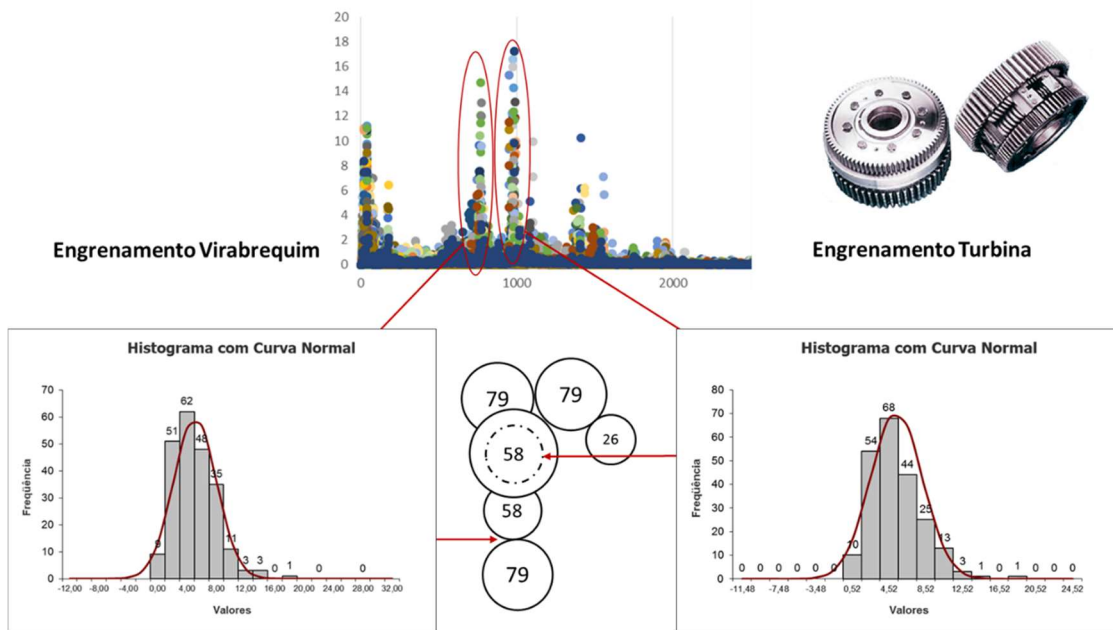


Figura 11 - Histograma de curva normal aplicado em cada frequência isolada

Com base na distribuição normal dos valores de pico das frequências e levando em consideração que quanto maior a amplitude de vibração maior é a criticidade do problema, quanto mais à direita no eixo "X" do gráfico mais severa é a vibração.

Por último, nessa etapa, com base nos valores gráficos gerados foi definido o nível de alarme para cada frequência entre nível aceitável, alerta e crítico. Ao fim da etapa, como mostrado na figura 12, cada frequência passou a ter seu próprio limite de tolerância do seu valor e

com base nele seria possível determinar quais intervenções seriam necessárias para tratar cada desvio.

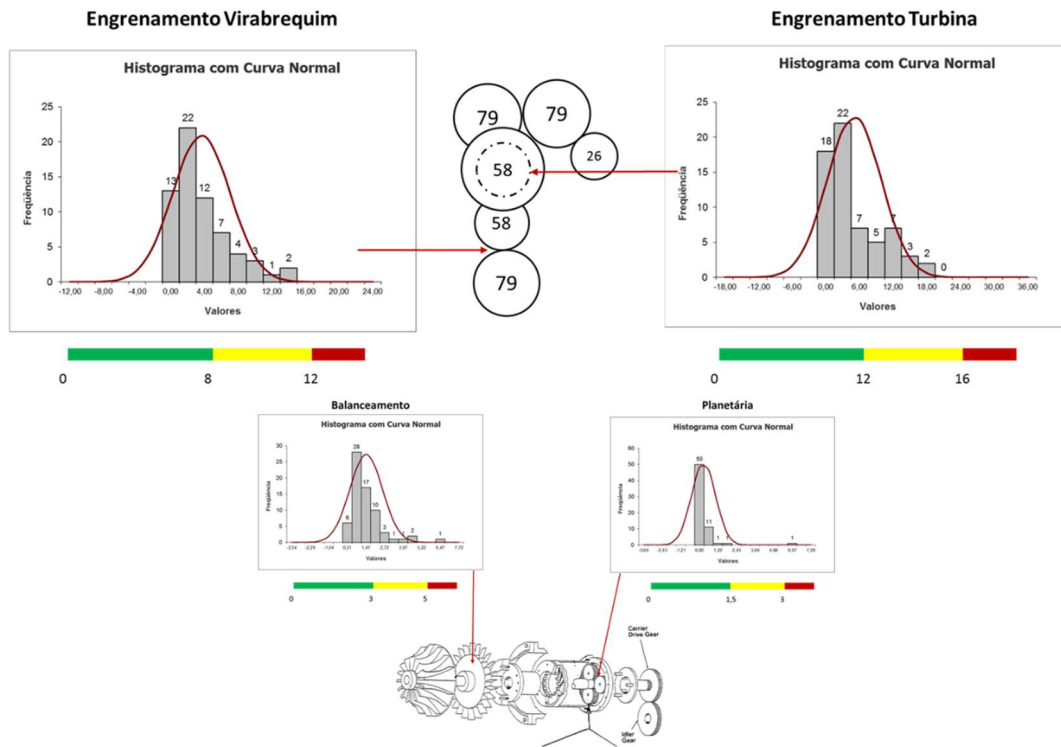


Figura 12 - Alarmes de alerta e crítico para cada frequência mapeada

Após o fim da terceira etapa o estudo foi replicado para os demais componentes de todas as frotas de locomotivas monitorados pela vibração. Em média cada locomotiva contem nove componentes monitorados e cada componente geralmente, de acordo com o gráfico de dispersão, apresenta em média 7 frequências distintas de falhas gerando um estudo de 280 histograma de curva normal.



Figura 13 - Replicação do estudo para alguns componentes da locomotiva

Com isso surgiu um problema grande na análise de vibração. Com a visão expandida do gráfico, gerada pelo estudo, cada frequência teria seu valor próprio e cada componente teria em média 9 parâmetros a serem conferidos para saber se deveria ser realizada alguma intervenção ou não. Com isso o tempo para realizar a análise ficou muito maior gerando impactos para a manutenção e demora na resposta da análise. Para tratar esse desvio gerado pelo estudo foi necessário desenvolver um software que realizaria a análise de forma automatizada.

O software foi alimentado com os intervalos de cada frequência isolada e seus limites ajustados de acordo com o histograma de curva normal. Além disso, conhecendo a origem de falha para cada frequência os textos de corretivas para cada uma foi padronizado, dessa forma, quando o software identifica algum desvio em uma determinada frequência ele

automaticamente faz o link do desvio no gráfico com a corretiva necessária para solucionar o problema.



Figura 14 - software desenvolvido para realizar a análise de vibração

## ANÁLISE DOS RESULTADOS

Para confirma o resultado do estudo foi realizado uma nova analise do espectro de vibração dos componentes que sofreram avaria no período de 2016 a 2017. Todos os componentes tiveram em alguma determinada frequência isolada variações críticas que indicariam o problema em coletas anteriores ao reboque da locomotiva. No exemplo citado no início do

artigo, quebra do compressor da locomotiva 8133, a análise de vibração com base no nível global de vibração não mostrava nenhum problema (figura 7), já na análise isolada das frequências o compressor mostrava um desvio na frequência de desbalanceamento do componente na coleta de vibração que antecedeu a quebra do componente (figura 15).

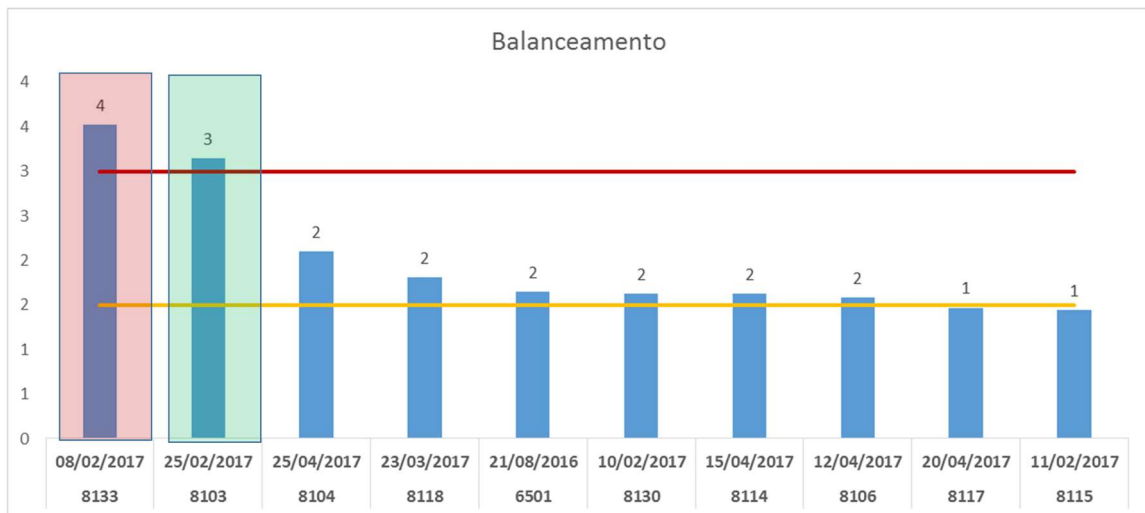


Figura 15 - Frequência de desbalanceamento do compressor

Para comprovar a eficácia do estudo locomotiva 8103, que também mostrava desvio na frequência de desbalanceamento, foi direcionada para a oficina de manutenção e o problema foi identificado evitando assim o reboque da locomotiva. O eixo carda que transmite o movimento do motor diesel para o compressor estava com sua flange empenada tracionando os coxins do eixo e causando deformação nos mesmos (figura16).



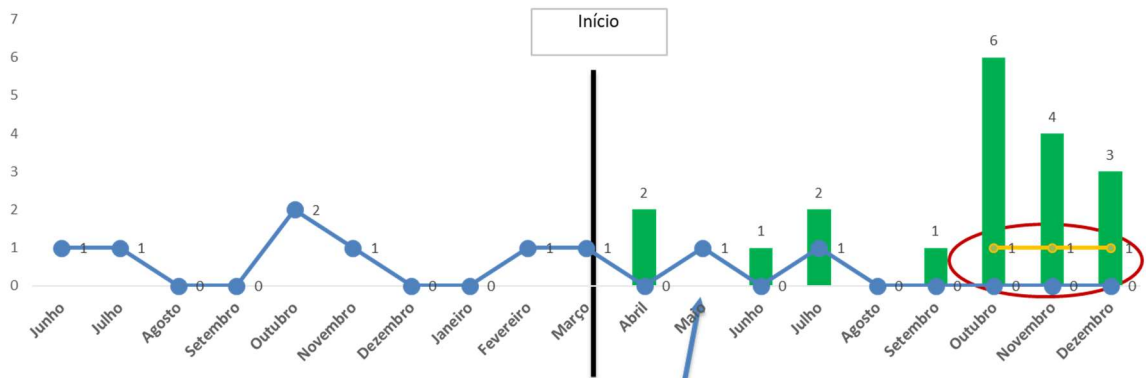
## Eixo cardam compressor - 8103



Figura 16 - Problema identificado no compressor da locomotiva 8103

Após a implementação do estudo diversos componentes foram indicados para corretiva com base nos alarmes gerados pelas frequências isoladas, barras indicadas na figura 17, diminuindo consideravelmente o número de reboques ao longo do período analisado. Até dezembro de 2017 foram condenados 16 componentes que apresentaram desvios em alguma de suas frequências de falha e todos os componentes, após peritagem, o problema foi confirmado.

# Reboques X Componentes condenados



Condenados: 16

3 Reboques (indicado)

16 Confirmados



Figura 17 - Reboque de locomotivas após início do projeto.

O projeto apresentou ganhos em diversos aspectos como por exemplo, redução no tempo da análise dos dados de vibração e tomada de decisão, maior confiabilidade e disponibilidade do ativo, otimização do processo, maior assertividade nas ações corretivas.

## **CONCLUSÕES**

Foi concluído nesse artigo que abordando um mesmo cenário com uma visão diferente podemos obter resultados satisfatórios que antes estavam camuflados, a busca por novas ideias deve ser realizada de forma contínua e que os resultados negativos nos indicadores de performance devem ser combustíveis para melhoria contínua dos processos.

A interação entre as áreas de uma empresa é chave fundamental para gerar bons resultados. Nesse estudo não seria possível obter ganhos satisfatórios se as áreas de manutenção, operação e reparação de componentes não fossem envolvidas.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

Apostila de curso de vibração da Petrobras, modulo 1

Apostila de análise de vibração 1 e 2 da SKF

DE ALMEIDA, Marcio Tadeu. Vibrações mecânicas para engenheiros. E. Blucher, 1990.

Bittencourt, Hélio Radke; Viali, Lori. Contribuições para o Ensino da Distribuição Normal ou Curva de Gauss em Cursos de Graduação. III Seminário Internacional de Pesquisa em Educação Matemática.

Luis Felipe Dias Lopes, Dr. Apostila de estatística

Professor: Carlos Alberto Bavastr. Apostila de Vibrações