



AEAMESP



21ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA
PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

ANÁLISE DE VIBRAÇÃO EM MATERIAIS RODANTES FERROVIÁRIOS

Daniel Augusto do Carmo
Douglas Nunes
Geovane Erlacher



AEAMESP



**21ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA
PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS**

CATEGORIA 3

ANÁLISE DE VIBRAÇÃO EM MATERIAIS RODANTES FERROVIÁRIOS

INTRODUÇÃO

As técnicas preditivas utilizadas em monitoramento de equipamentos são importantes para verificar a verdadeira condição de um ativo, conforme (KARDEC, Alan & NASCIF, Júlio, 2012, p. 53). A técnica de análise de vibração baseia-se no fato de que no geral cada componente de um equipamento possui um sinal característico que indica se a sua condição está normal ou não. De acordo com Rao (2008, p. 5):

“...O desbalanceamento de motores a diesel, por exemplo, pode causar ondas terrestre de potência suficiente para causar incômodos em áreas urbanas. As rodas de algumas locomotivas podem afastar-se mais de um centímetro do trilho em altas velocidades devido ao desbalanceamento...”

As máquinas produzem energias vibracionais que são transmitidas por ondas mecânicas através do meio físico que permite isso acontecer. Segundo Jesus & Cavalcante (2011), na observação de um fenômeno vibratório, o conteúdo de frequências depende do agente causador e do ambiente pelo qual se propaga.

Para quantificar os valores das vibrações as medições devem ser realizadas levando em consideração as amplitudes das oscilações, os níveis em função do tempo e o nível de energia. Normalmente os parâmetros mais utilizados para medir as amplitudes das oscilações são a zero-a-pico e pico-a-pico, vibrações em função do tempo valor médio e a energia valor quadrático médio ou RMS.

Os valores obtidos através das medições de vibrações das máquinas podem ser analisados de forma global ou por espectro. Ao analisar o valor global, percebem-se as energias mecânicas que estão atuando num dado equipamento, podendo ser expressas nas



AEAMESP



grandezas: deslocamento, velocidade e aceleração. Na análise espectral é possível identificar as frequências específicas conforme a origem da sua energia dentre os quais podemos ter engrenagens, rolamentos, mancais entre outros.

Falando ainda de análise espectral, existe a possibilidade de desenvolver alarmes por bandas laterais, que identifica os níveis de alerta e perigo em banda de frequências definidas para cada modulo de falha do ativo monitorado. Este tipo de alarme favorece maior assertividade no diagnóstico, pois deixa de estar na sensibilidade do analista.

DIAGNÓSTICO

A aquisição de dados de vibração pode ser feita de forma *off-line* ou *online*, dependendo da viabilidade ou necessidade. É através das coletas de dados de vibração, nos pontos de medição preestabelecidos, que esses “sinais” gerados pelos equipamentos, são processados e analisados.

Quando uma ou mais máquinas são instaladas em uma mesma plataforma móvel, como por exemplo locomotivas e vagões, torna-se difícil isolar essas fontes de energia sendo elas somadas e dissipadas pela própria plataforma. Para fazer análise espectral em plataformas móveis é necessário ter conhecimento das frequências e energias de cada subcomponente separadamente que está sendo monitorado. Conforme ALMEIDA (2003, p. 13) o comportamento dinâmico da máquina é uma composição das perturbações de todos os componentes, defeitos e das excitações oriundas do serviço.

Dessa forma entende-se que para os materiais rodantes das ferrovias devem ser tratados de forma diferente, visto que, são equipamentos geralmente numerosos inviabilizando a instalação de ferramentas *onlines* e por se tratarem de plataformas móveis.

Em seguida é observado uma análise espectral de dois componentes diferentes que estão instalados sobre uma mesma plataforma.

Na figura 01, observa-se um espectro de análise de vibração do soprador dos motores de tração de uma locomotiva, sendo que, a frequência em destaque de 35 HZ no espectro não é gerada por ele e sim pelo motor Diesel, o que caracteriza frequência externa a este componente.

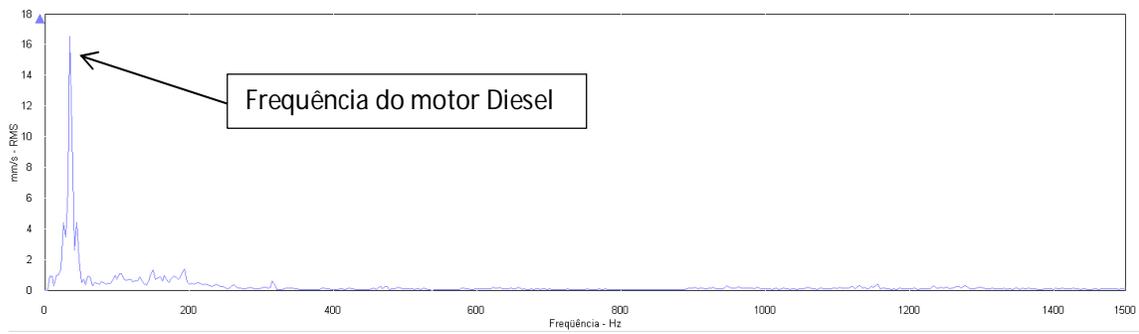


Figura 1 - Influência do motor no soprador, fonte: própria.

Nesta outra figura 02, observa-se o espectro de vibração da turbina, de um motor Diesel de uma locomotiva, e novamente a frequência de 35 HZ relativa a duas vezes a rotação do motor aparecendo em destaque no espectro, ou seja, também externa a este componente. Esta frequência não é múltipla da rotação da turbina, pois a rotação nominal do turbo e de 22000 RPM para esse motor que corresponde a 366,66 Hz. SÁ, M. (2000, p.13) fala que: “o fato gerador de vibrações e a RPM da máquina e todas frequências do espectro serão proporcionais a esta rpm, apresentando inteiras ou fracionadas”.

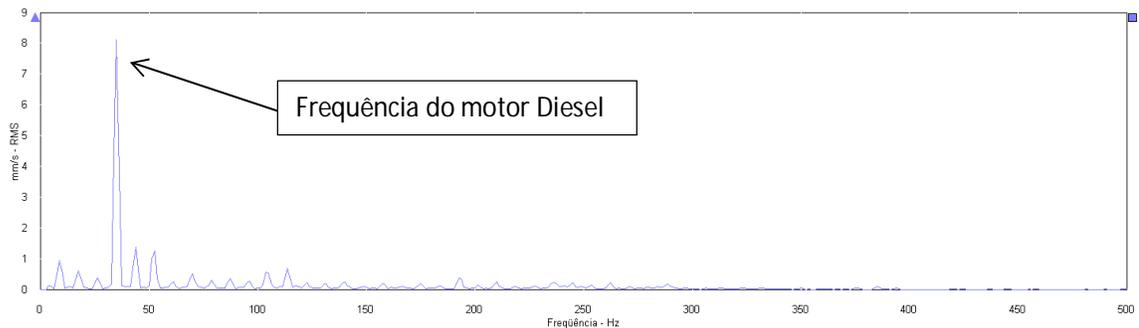


Figura 2 - - Influência do motor no soprador, fonte: própria.

Periodicidade de coleta de dados.

Em sistemas de análise de vibração não embarcados é necessário definir uma frequência de coleta para que as análises sejam feitas. Essa forma de obtenção de dados muitas vezes é mais barata, necessitando apenas de poucos aparelhos de coletas de dados. Porém, o

principal ponto negativo é que há a possibilidade de ocorrerem falhas catastróficas entre as coletas.

A frequência de coleta dos equipamentos depende diretamente das características de crescimento da probabilidade de falha do equipamento em falhar entre uma coleta e outra. Por isso é preciso estudar qualitativamente ou quantitativamente o equipamento.

Dentro da análise qualitativa procura-se encaixar as coletas de dados no menor ciclo de manutenção existente do ativo principal, buscando assim evitar paradas paralelas para realizar a coleta dos dados. Já em uma análise quantitativa, é estudada a vida do equipamento, através das curvas da distribuição estatística que a representa. A frequência de coleta é um dos itens que auxilia na priorização de um subcomponente.

Determinar Subcomponentes

Para determinar quais subcomponentes do ativo principal que seriam analisados posteriormente pela técnica de vibração, mostra-se interessante unir ferramentas direcionadoras de processo já consolidadas no universo da manutenção, são elas: O FMEA e a matriz de priorização GUT, mas deve-se perceber que elas não devem dificultar ou impedir que as técnicas preditivas sejam utilizadas nos processos atuais de manutenção, observando à oportunidade de ganhos de processo a técnica deve ser testada e validada quando possível.

O FMEA (Failure Mode Effect Analysis) do subcomponente, quando existente, quantifica o quanto a técnica preditiva será eficiente no monitoramento da condição e na prevenção de falhas. Quando o modo de falha é apresentado e é possível observar uma mudança padrão desse modo de falha no espectro, podemos dizer que a utilização da análise de vibração é

possível. Quanto maior o número de modo de falhas detectáveis pela ferramenta preditiva maior a sua viabilidade de aplicação técnica.

Para um direcionamento estratégico de quais subcomponentes devem ser acompanhados, deve-se priorizar da maneira que gerará mais impactos positivos para o gerenciamento da manutenção.

Segundo PERIARD G. (2011) a matriz de priorização GUT é muito utilizada pelas empresas para priorizar os problemas que devem ser solucionados ou amenizados, bem com para a análise de prioridades de certas tarefas que a organização deve executar, atendendo as estratégias da companhia.

A sigla GUT, significa Gravidade, Urgência e Tendência. Para esse trabalho entende-se como gravidade o quanto é impactante a falha daquele subcomponente em específico para o cliente, a urgência como sendo o tempo de reparo associado ao seu custo e a tendência como sendo a possibilidade de falha do equipamento entre o ciclo de coleta de dados.

Tabela 1 - Diagrama GUT, Fonte: Própria

Subcomponentes	Pontos do GUT			Total de Pontos	Prioridade
	Gravidade	Urgência	Tendência		
Turbina	8	8	8	512	1
Sopradores	7	8	8	448	2
Bomba de transferência de combustível	8	7	7	392	3
Motor Diesel	7	7	7	343	4
Bomba de pressão de óleo	8	6	7	336	5
Compressores	7	6	7	294	6
Bomba d'água	7	6	6	252	7
Alternador	7	5	6	210	8



AEAMESP



Alarmes de vibração

Quando determinados os componentes e a periodicidade da coleta de dados define-se como o processo de manutenção será acionado para intervir no equipamento. Para isso ocorra existem vários tipos de alarmes derivados da análise espectral, os mais utilizados são os globais e por banda.

Como os materiais rodantes apresentam dificuldades supracitadas, logo, esses mesmos fatores são refletidos na dificuldade em determinar quais os níveis de amplitude são prejudiciais ao equipamento.

Como é característico da ferrovia apresentar repetição de modelos de equipamentos, como vagões e locomotivas, percebe-se então a oportunidade de desenvolver um estudo estatístico para determinar os valores de amplitude aceitáveis para o alarme global e por banda, baseados também nas taxas de falhas atuais dos subcomponentes e na capacidade de intervenção da equipe de preditiva.

ANÁLISE DOS RESULTADOS

Determinando níveis de alarmes

Inicialmente foi realizado estudo nos alarmes por bandas, que apresentariam resultados mais específicos, visto que esse tipo de alarme direciona para certo tipo de modo de falha, enquanto que alarmes globais, usualmente, dão parâmetros em termos gerais da condição do equipamento. Foi percebido que os valores globais dos subcomponentes sofrem grande influência do ativo principal, como exemplo: da locomotiva ou do vagão, e em nosso caso este está sobre uma plataforma móvel.

Para determinar os níveis de alarmes por banda e global é proposto nesse trabalho a seguinte forma de se definir os níveis de alarmes:

1. Extrair valor máximo de cada banda e o valor global de cada espectro;
2. Determinar tamanho de amostra populacional;
3. Distribuição estatística;
4. Retirar *Outliers*;
5. Determinar valores dos alarmes.

Extração do valor máximo de cada banda e o valor global de cada espectro.

Para definir estatisticamente os valores de alarme da banda precisa-se extrair o valor máximo da cada banda de cada espectro para servir de amostra do estudo. Através de estudo prévio do equipamento já é possível definir quais são as bandas representativas para o monitoramento da condição deste subcomponente.

Determinando o tamanho da amostra populacional.

Antes de determinar o tamanho da amostra é preciso entender qual é a população a ser analisada. Esse trabalho propõe determinar quais as amplitudes máximas para cada banda e o valor do nível global do espectro, com isso, a população deve ser baseada na quantidade de espectros amostrados e não na quantidade de equipamentos amostrados.

Conforme LEVIN (1987), para o caso onde a população é grande, o pesquisador estuda um pequeno grupo de indivíduos da população, denominado de amostra. Para determinarmos o tamanho ideal da amostra fazemos:

$$n = \left(\frac{Z \cdot \sigma}{E} \right)^2$$

Onde:

n = Tamanho da amostra.

Z = Valor de perigo relacionado ao grau de confiança desejado.

σ = Desvio padrão populacional da variável estudada.

E = Margem de erro desejada.

Tabela 2 - Tabela de valores De perigos para amostragem.

Grau de Confiança	Valor Crítico (Z)
90%	1,645
95%	1,96
99%	2,575

Quando σ (desvio padrão) não é conhecido é sugerido que seja amostrado aleatoriamente 31 elementos da população e calculado seu desvio padrão piloto. O valor de σ pode ser refinado aumentando o tamanho desse piloto.

No exemplo, apresentado pela tabela 3, pela facilidade da obtenção dos dados, foram amostrados **700** espectros para determinar o desvio padrão (σ). Foi escolhido um grau de

confiança de 99% com um erro admissível de 0,1 un. (unidade de medida) na amplitude por banda e de 1 un.(unidade de medida) para os globais.

Tabela 3 - Necessidade de tamanho de amostras, Fonte: Própria

Alarme	Desvio padrão (σ)	Tamanho da amostra (n)
Banda 1x Hv	0,56	211
Banda 2x Hv	0,58	226
Banda 3x Hv	0,54	191
Banda 4x Hv	0,54	194
Banda 1x Acc	0,55	202
Banda 2x Acc	0,59	232
Banda 3x Acc	0,50	168
Banda 4x Acc	0,54	193
Global HV	13,86	566
Global Acc	4,16	51

Observa-se que pela tabela 03 que o tamanho da amostra necessária é menor que o tamanho já amostrado. Com isso pode-se afirmar que o restante da análise atenderá no mínimo o grau de confiança e os erros esperados.

Distribuição estatística dos máximos das bandas e dos valores globais.

Com os dados amostrados utilizam-se softwares estatísticos para determinar qual a melhor distribuição estatística que representam os dados. Pode-se primeiramente criar histogramas que facilitam visualmente identificar ou ao menos aproximar qual distribuição é a mais adequada.

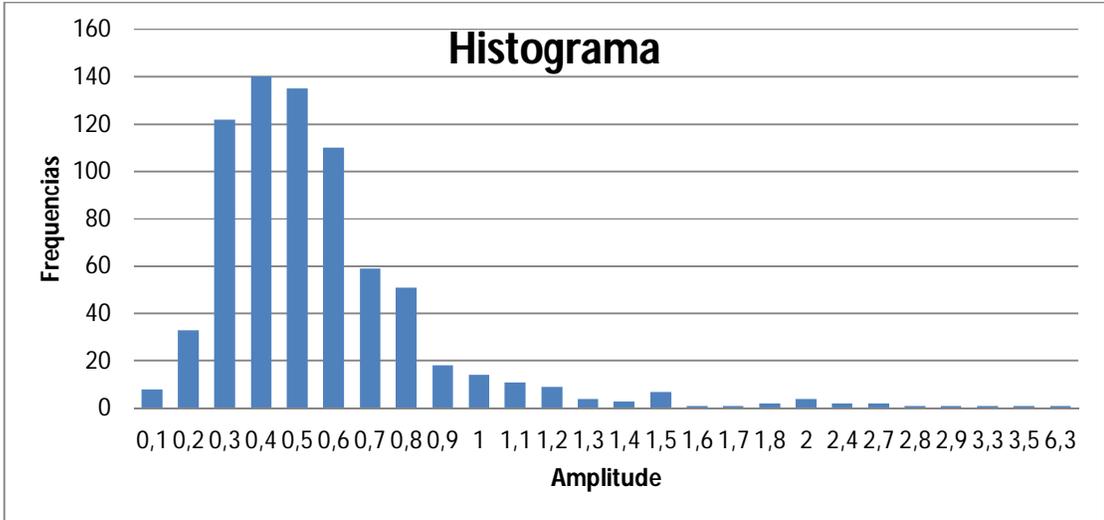


Figura 3 - Histograma, fonte: própria

Observa-se pelo histograma da figura 03 que as amplitudes máximas seguem aproximadamente uma distribuição lognormal.

Para definir os níveis (amplitudes) normais de ocorrência é interessante transportar os dados para uma distribuição normal. Existem várias formas para realizar esse transporte quando conhecida a distribuição amostrada. Foi utilizado o método proposto por ITL(2000), que orienta aplicar diretamente o logaritmo em cada dado amostrado, quando a distribuição é lognormal. A figura 04 apresenta os dados da figura 03 quando aplicado logaritmos nos dados amostrados.

Já para nível de alerta observa-se a capacidade da equipe preditiva em analisar os dados obtidos. Quanto maior o número de alarmes de bandas e gerais maior a probabilidade de um estar fora dos valores aceitáveis.

Define-se:

$$PO = (1 - CE)^{1/Na}$$

Onde:

PO = probabilidade de ocorrência;

CE = Capacidade da equipe;

Na = Número total de alarmes do componente.

Como exemplo, supõem-se 9 diferentes tipos de alarmes para o mesmo componente, capacidade de análise da equipe 20% dos equipamentos. Com isso temos:

$$PO = (1 - 0,2)^{1/9} \approx 0,975$$

Ou seja, toda amostra onde a amplitude estiver acima de 97,5% da normal será considerado como nível de alerta.

Quando obtidos esses valores deve-se lembrar que os dados estão sendo trabalhados transformados para normal, nesse caso foi aplicado logaritmo nos dados, devemos retornar os valores obtidos para os valores de medição, no caso estudado basta aplicar exponencial nos valores. A figura 05 apresenta uma ilustração com um caso exemplificado.

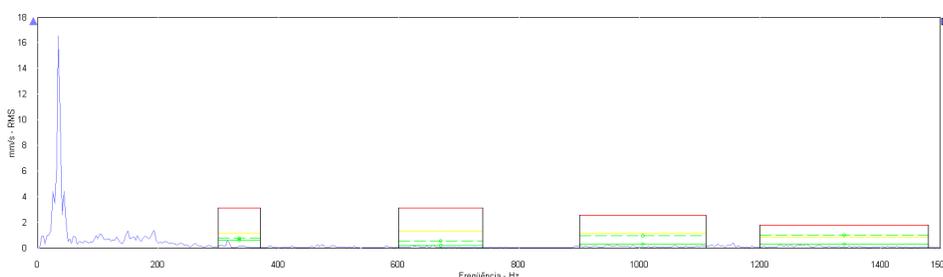


Figura 5 - Espectro com alarme de banda calculados, fonte: própria.



AEAMESP



Quando esse método foi aplicado na frota de locomotivas da Estrada de Ferro Vitória Minas, conseguiu-se redução de tempo de análise de vibração, aumento da confiabilidade das análises que, por conseguinte, possibilitou o aumento da vida dos subcomponentes, assim como evitar suas falhas.

CONCLUSÃO

Das técnicas preditivas utilizadas nas ferrovias, as análises de espectros de vibração mostram ser promissoras para determinar as condições dos componentes dos materiais rodantes. Com ela pode-se identificar um grande número de problemas e desmitificar falhas que anteriormente eram dadas como certas.

Nesse mesmo universo, o da ferrovia e de análise de vibração, observa-se certas dificuldades na determinação de alguns diagnósticos, pelo fato dos materiais rodantes estarem em uma plataforma onde que as energias mecânicas acabam sendo misturadas. Porém, existe uma possibilidade de se estudar um comportamento padrão dos subcomponentes, porque existe repetição de modelos de ativos na mesma companhia, uma característica inerente a ferrovias.

Com o auxílio de ferramentas estatísticas identifica-se padrões de normalidade dos subcomponentes para determinar níveis aceitáveis de operação. Ainda existem grandes possibilidades de desenvolvimentos futuros, principalmente no desenvolvimento de sistemas de decisão automático baseados nos níveis de alarmes aqui definidos.

Hoje, mesmo sem esse sistema, conseguiu-se resultados positivos para o sistema de manutenção dos materiais rodantes da estrada de ferro Vitória Minas, reduzindo o tempo despendido nas análises e com aumento da assertividade de intervenção da equipe da equipe preditiva.



AEAMESP



REFERÊNCIAS

ITL, **ENGINEERING STATISTIC HANDBOOK**,

<http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/eda/section3/eda35h3.htm> , acesso em:

28/07/2015

Jesus e Cavalcante, **Utilização De Bancadas De Ensaio Para Estudo Do Comportamento Dinâmico De Máquinas Rotativas - Vibrações Mecânicas**, UFBA, 2011 (Monografia)

KARDEC, Alan & NASCIF, Júlio, **Manutenção Função Estratégica**, 4ª Edição, Rio de Janeiro: Qualitymark Ltda, 2012.

LEVIN, Jack. **Estatística Aplicada a Ciências Humanas**.2a. Ed. São Paulo: Editora Harbra Ltda, 1987.

PERIARD G. **Matriz GUT – Guia Completo**, 2011

<http://www.sobreadministracao.com/matriz-gut-guia-completo/>. Acesso em: 10/06/2015

RAO, S., **Vibrações Mecânicas**, 4ª Edição, São Paulo: Person Prentice Hall, 2008.

TRIOLA, Mário F. **Introdução à Estatística**. 7a. Ed. Rio de Janeiro: LTC, 1999.