

## **4º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS**

### **CATEGORIA 3**

**DESENVOLVIMENTO DA MANUTENÇÃO PREDITIVA NOS ROLAMENTOS DOS MOTORES DE TRAÇÃO E MANCAIS DOS RODEIROS DA NOVA FROTA DE TRENS DA LINHA 5 DO METRÔ-SP UTILIZANDO A TÉCNICA DE ANÁLISE DE VIBRAÇÃO.**

#### **1. INTRODUÇÃO**

##### **1.1. Manutenção Preditiva: Análise de Vibração**

Nos diversos setores metroferroviários, é de suma importância à alta disponibilidade e confiabilidade de máquinas e equipamentos, os gestores deste segmento têm procurado constantemente realizar um bom planejamento da manutenção que permite reduzir paradas não programadas, executar intervenções adequadas, racionalizar o consumo de materiais sobressalentes, otimizar recursos humanos e financeiros, reduzir eventuais impactos ambientais e aumentar a produtividade.

Nesse contexto, o conceito de manutenção preditiva vem ganhando destaque. A manutenção preditiva é aquela que é realizada a qualquer tempo, visando identificar e corrigir uma fragilidade ou potencial de falha percebido antecipadamente à ocorrência de um problema.

Na manutenção preditiva são registrados e analisados, em tempo real, vários fenômenos, tais como: vibrações das máquinas, emissão acústica, pressão, temperatura, desempenho, aceleração, etc. Este tipo de manutenção indica as condições reais de funcionamento das máquinas com base em dados que informam o seu desgaste ou processo de degradação, e assim prediz o tempo de vida útil dos componentes das máquinas e equipamentos e as condições para que esse tempo de vida seja bem aproveitado.

Dentre as diferentes ferramentas da manutenção preditiva, uma que é muito utilizada, por permitir obtenção de uma maior riqueza de informações acerca das condições do equipamento e a mais difundida para previsão de falhas em mancais de rolamento, é a técnica de “Análise de Vibração”. Esta técnica consiste no monitoramento da vibração seguido de sua análise por meio da identificação das frequências características de falha. Os impactos periódicos, gerados pela passagem dos elementos do rolamento pelos defeitos, excitam vibrações de curta duração em frequências naturais elevadas. Com isso, são geradas bandas espectrais, das quais se pode avaliar a intensidade e distribuição de energia, viabilizando a identificação do estágio de degradação do rolamento.

A vibração é uma oscilação de um corpo em torno de uma posição de referência. O movimento vibratório é a resposta de uma máquina às forças dinâmicas que a excitam. Os sistemas mecânicos contêm três componentes básicos que interagem entre si e são responsáveis pelo comportamento dinâmico. São eles: mola (rigidez ou flexibilidade), amortecedor (dissipação de energia), e massa (inércia). Submetidos às forças, eles reagem com deslocamento, velocidade e aceleração.

## 1.2. Mancais e Rolamentos

Mancais de rolamento possuem aplicações domésticas e industriais amplamente difundidas na atualidade. Esses têm por meta suportar uma carga, em geral caracterizada por um eixo, permitindo seu movimento rotacional em relação à estrutura da máquina rotativa, o funcionamento apropriado de tais dispositivos depende, em grande parte, de um contato suave entre seus componentes. Em aplicações industriais, mancais de rolamento são classificados como componentes mecânicos críticos, uma vez que as ocorrências de falhas nesses dispositivos constituem a principal causa de colapso de máquinas rotativas.

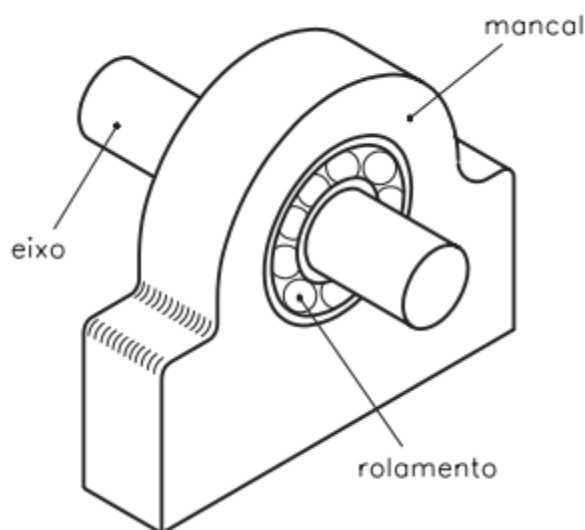


Figura 1 – Componentes de Um Mancal de Rolamento. (Fonte: *Google Images*)

O rolamento é a peça do mancal empregada com a finalidade de suportar carregamentos e permitir movimento relativo entre duas partes (normalmente eixo e máquina). Vale ressaltar que o emprego desse dispositivo permite o trabalho do eixo sem acarretar o seu desgaste devido a seu movimento relativo. Os principais componentes de um rolamento são: pista externa, gaiola, elementos rolantes e pista interna. Esses estão mostrados na Figura 2.

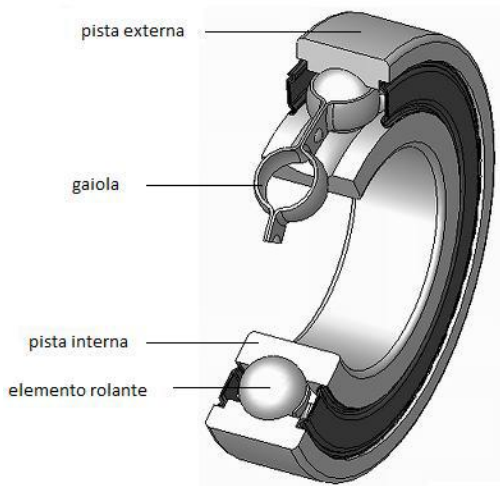


Figura 2 – Componentes de um Rolamento. (Fonte: *Google Images*)

Os elementos rolantes se deslocam ao longo das pistas, com pouca resistência e deslizamento, mantidos separados pela gaiola, a fim de mantê-los adequadamente distanciados para promover uma distribuição de cargas homogênea entre os mesmos.

### 1.3.Vibração em Mancais de Rolamentos

Assim como outros componentes em um equipamento, os rolamentos defeituosos apresentam frequências características, em função da localização do defeito. Defeitos em rolamentos podem ser prognosticados através da medição de vibração e pelo monitoramento da presença das frequências de defeitos e seus múltiplos, portanto o diagnóstico não deverá

levar em conta apenas a amplitude. As frequências de defeito são calculadas levando em consideração as características construtivas dos rolamentos. As expressões utilizadas para o cálculo estão mostradas na figura 3 abaixo:

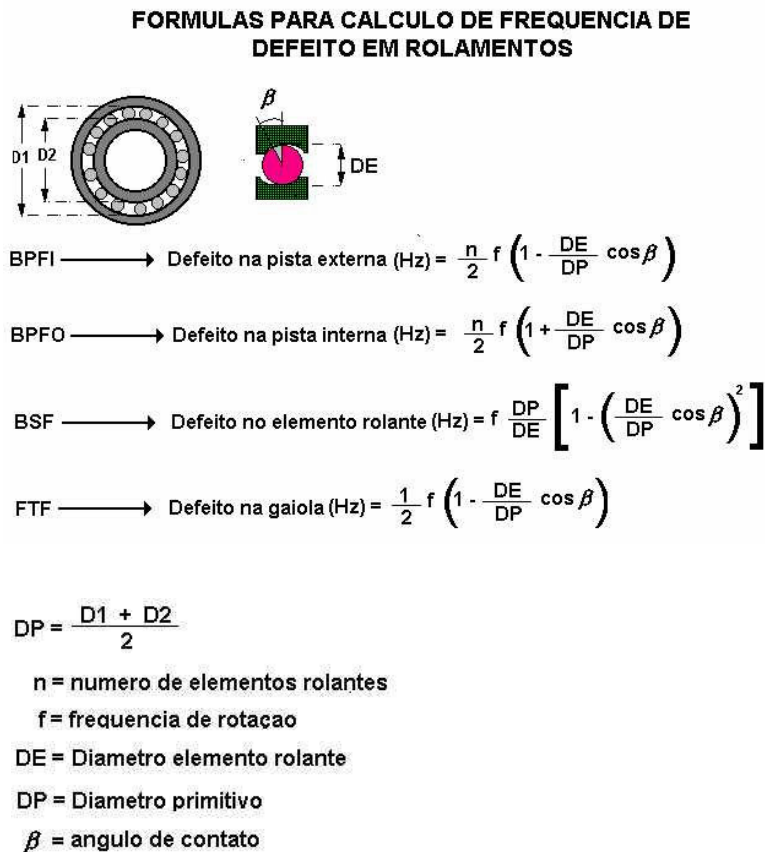


Figura 3 - Fórmulas para cálculo das frequências de defeitos em rolamentos.

### 1.3.1. Técnicas no Domínio da Frequência

As técnicas no domínio da frequência, ou análises espectrais do sinal de vibração, sejam talvez a abordagem mais utilizada na detecção de defeitos em rolamentos. A interação entre os defeitos e os elementos adjacentes, produz pulsos de curta duração no decorrer do movimento rotacional. Esses pulsos excitam as frequências naturais dos elementos do

rolamento e da carcaça do mancal, resultando em um aumento da energia vibracional. As frequências de ressonância podem ser obtidas teoricamente, calculadas por meio de equações.

É difícil estimar-se o quanto essas ressonâncias características de falhas são alteradas pela presença dos demais componentes do mancal, após sua montagem completa. Entretanto, estas tais ressonâncias não são alteradas significativamente.

Com o advento da Transformada Rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform* - FFT), o trabalho de obtenção de bandas espectrais tornou-se mais eficiente. Sua finalidade consiste em permitir a mudança em um sinal obtido no domínio do tempo para o domínio da frequência. Isso se faz necessário uma vez que, em geral, os gráficos obtidos no domínio do tempo contêm um excesso de informação, já que são influenciados por diferentes amplitudes que se repetem em diferentes períodos de tempo. Ocorre então, a superposição de diferentes amplitudes oriundas de ressonâncias excitadas nos componentes do mancal, tornando o sinal excessivamente complexo. Com a mudança de domínio, é possível filtrar o sinal evitando essa repetição e superposição das amplitudes. A Figura 4, abaixo, mostra um desenho esquemático representativo de tal mudança.

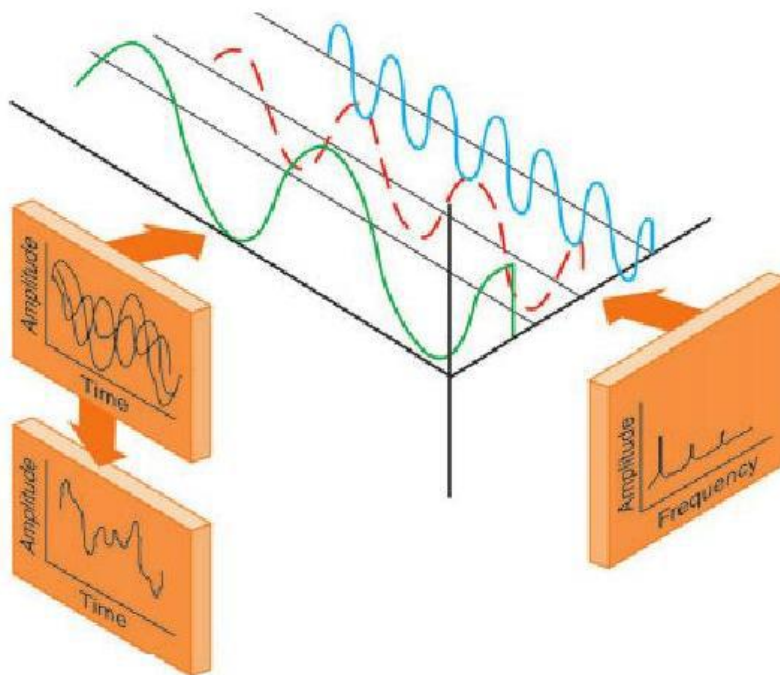


Figura 4 – Exemplo de mudança entre domínios do Tempo e de Frequência

Após a aplicação da FFT, têm-se as amplitudes plotadas nas ordenadas relacionadas às suas frequências de repetição nas abscissas. Por exemplo, se for gerado um sinal senoidal de amplitude 1 e frequência 3 Hz, após a aplicação da FFT obtém-se uma concentração em torno da frequência fundamental deste sinal, como mostrado na Figura 5. A FFT se diferencia da Transformada de Fourier por possuir uma menor complexidade e envolver um menor esforço computacional para resolução.

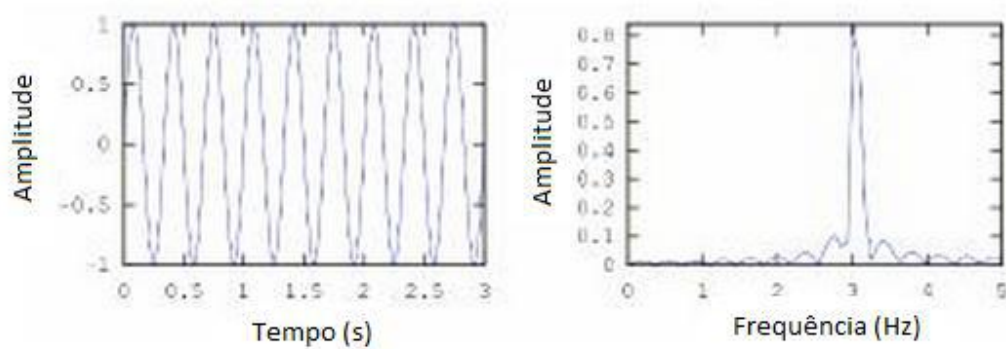
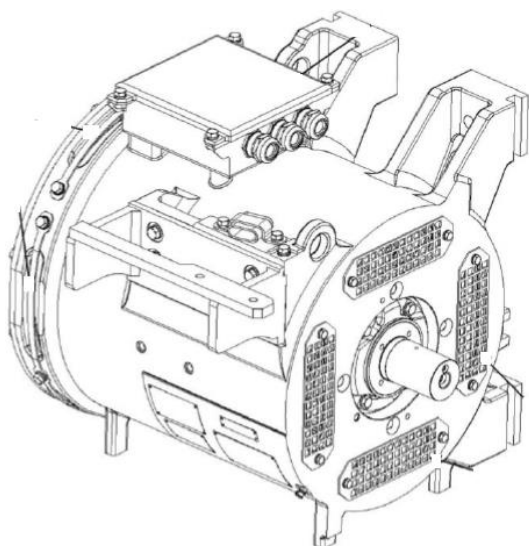


Figura 5 – Exemplo de aplicação da FFT

## 2. DIAGNÓSTICO

### 2.1.Características do Motor de Tração – Frota P



Tipo - Motor de indução trifásico do tipo gaiola de esquilo, autoventilado com 4 polos, (MB-5145-A).

Categoria de classificação - Contínua

Saída - 185 kW

Tensão - 1100 V

Corrente - 125 A

Revolução - 2650 rpm

Frequência - 90 Hz

Deslizamento- 2,2%

Eficiência- 92%

Revolução máxima- 4600 rpm

Revolução de ensaio máxima- 5520 rpm

Classe de isolamento- 200

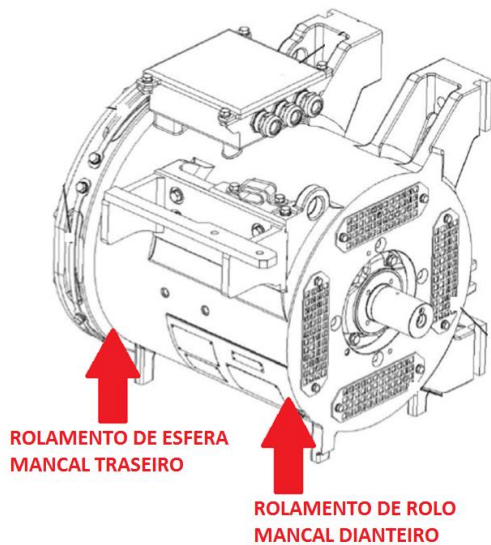
Dimensão- 615x670x685 mm

Peso- 525 kg

Desenho dimensional - H7F1394

Existe um rolamento de rolo do lado da transmissão do rotor (Modelo NU214C4P6 da SKF) e um rolamento de esfera do lado contrário à transmissão do rotor (Modelo 6311 C4P6 da SKF).

Os rolamentos são do tipo com isolamento, o que evita a corrosão eletrolítica.



Os rolamentos do lado de transmissão e do lado oposto à transmissão possuem as seguintes características:

Um retentor do tipo com guia de esferas é utilizado como uma contramedida contra a geração de calor e o desgaste causado pelo atrito de escorregamento no interior da superfície guia do rolamento de rolo.

Uma câmara de lubrificação está localizada nos rolamentos do lado de transmissão e no lado oposto à transmissão.

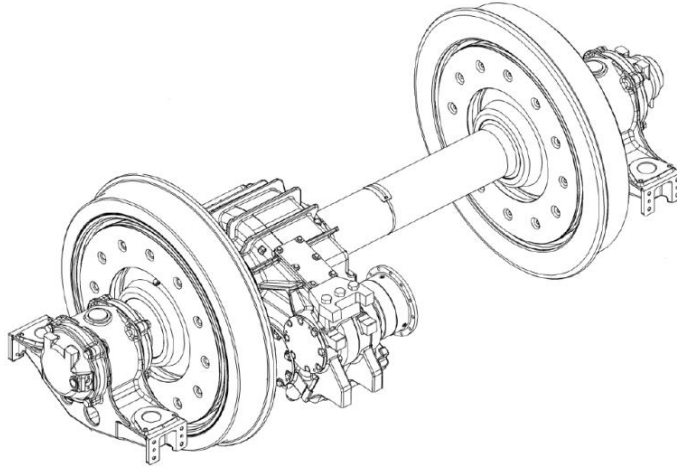
Para prevenir a penetração de poeira e água de chuva no rolamento, está instalado um labirinto reforçado na tampa do mesmo.

Para que a lubrificação provisória dos rolamentos seja possível, existem tubos de lubrificação nos mancais lado dos de transmissão e no lado oposto à transmissão.

A função dos rolamentos é proporcionar uma interface de contato de pouco atrito entre o rotor e a armação do estator.

Lubrificante UNIMAX R Nº 2.

## 2.2.Características do Mancal de Rodeiro – Frota P



As caixas de rolamentos têm a finalidade de transmitir todos os esforços do eixo ao chassi do truque através da suspensão primária.

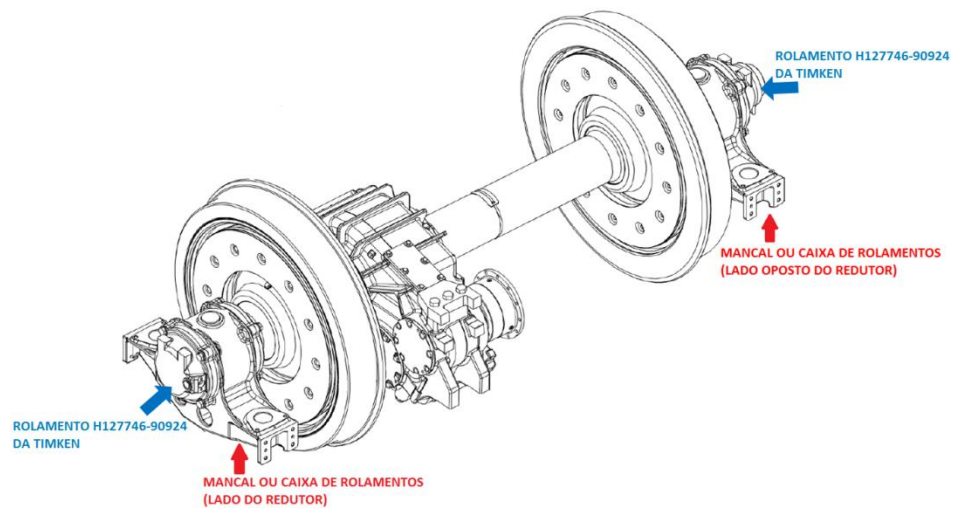
Realizam a função de conexão entre os elementos de rotação e o resto do veículo através de um rolamento de fileira dupla de roletes cônicos alojados em seu interior. As cargas verticais, longitudinais e transversais, são sustentadas pelo rolamento.

As caixas de rolamentos de acordo com o sistema de suspensão primária são formadas por um corpo de forma circular, que aloja os rolamentos em seu interior, do qual saem dois braços laterais convenientemente mecanizados e sobre os que se apoiam as molas da suspensão primária.

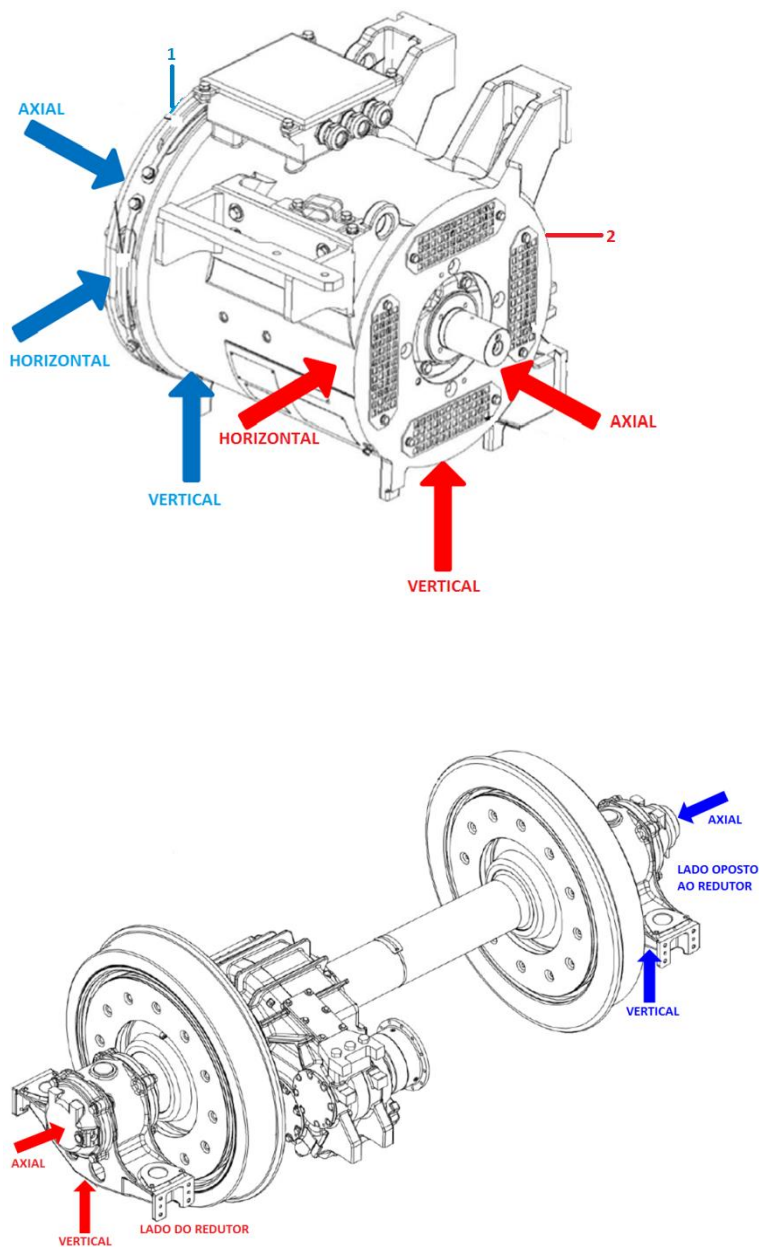
Cada caixa de rolamentos conta com um rolamento do fabricante TIMKEN. O rolamento utilizado em todas as caixas de rolamentos é o mesmo.

Rolamento compacto TIMKEN: H127746-90924.

Os rolamentos montados no interior da caixa de eixo são do tipo de cartucho compacto de roletes cônicos.



### 2.3. Localização dos Pontos de Medições da Análise de Vibração nos Motores de tração e rodeiros.



## 2.4. Software SKF @ptitude Analyst – Configuração de Hierarquias e Propriedades dos Pontos de Medição.

### 2.4.1. Visão Geral do Processo de Medição

- Utilização do software @pitude Analyst para configurar o banco de dados de medição de condição de máquina.
- Realização do download dos PONTOS de medição configurados para o DAD (Dispositivo de Aquisição de Dados).



*Dispositivo de Aquisição de Dados*

- Utilização do DAD para percorrer a ROTA e coletar dados de medições.
- Após a coleta de dados, fazer o upload dos dados de medições coletados para o @pitude Analyst.
- Utilização do @pitude Analyst para identificar máquinas com condições anormais, analisar espectros, tendências e compartilhar resultados de medições de condições de máquinas.
- Utilização do SAM para registrar as condições das máquinas, gerar históricos, gerar relatórios e gerar gráficos estatísticos para gerenciamento de toda a planta.

#### 2.4.2. Visão Geral da Janela Hierarquia

- A hierarquia organiza as medições das máquinas em uma estrutura hierárquica com CONJUNTOS e PONTOS de medição de acordo com a planta.
- Pode ser aberta mais de uma hierarquia por janela.
- Pode copiar e mover CONJUNTOS, MÁQUINAS e PONTOS entre hierarquias.
- Na Análise de Vibração do PCR (L5), a Hierarquia foi organizada conforme imagem abaixo. Dentro da pasta (conjunto) TREM PCR existe as frotas que fazem parte dela, no caso, as frotas F e P. Dentro das pastas Frota F e Frota P, se encontram os conjuntos de máquinas que realizamos as análises, Motor de Tração e Rodeiro. Dentro dos conjuntos Motor de Tração e Rodeiro se encontram as máquinas que corresponde ao um nº de série. Dentro de cada máquina se encontram os pontos de medição.



#### 2.4.4. Propriedades dos Pontos

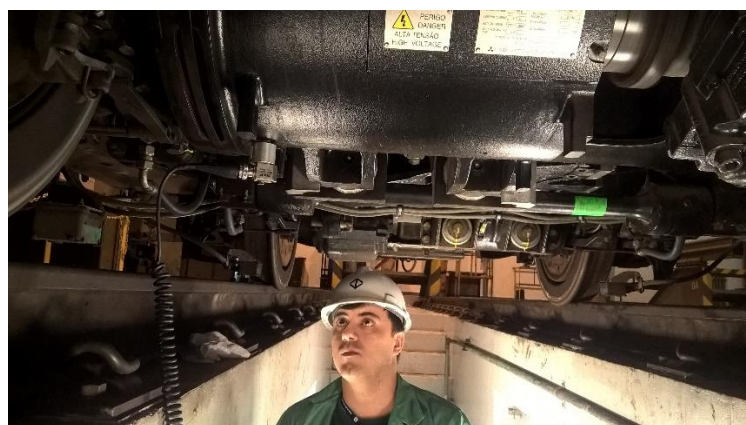
Os dispositivos de aquisição de dados medem e armazenam parâmetros selecionados de vibração tais como vibração global, vibração global em faixas selecionadas de frequência, espectros, formas de onda no tempo, órbitas, diagramas cascata, medidas de alta frequência e espectros de detecção de envelope. A vibração geral normalmente é armazenada como velocidade de vibração em pico ou RMS, e relacionada com pontos em uma rota pré-estabelecida, que pode incluir muitas máquinas. Os dados são armazenados em um computador capaz de calcular sua tendência com informações previamente coletadas, de forma que possam ser determinadas quaisquer mudanças nas condições de máquina.

The 'Propriedades do PONTO' dialog box is shown with the 'Ajuste' tab selected. The 'Alarma de velocidade' section has 'Fundo escala' set to 10 mm/s and 'Entrada mV/AJE' set to 100. The 'Detecção' dropdown is set to 'RMS', and the 'Ativar ICP' checkbox is checked. The 'Tipo de freq.' dropdown is set to 'Amplitude fixa', and 'Linhas' is set to 400. The 'Salvar dados' dropdown is set to 'FFT', and 'Janela' is set to 'Hanning'. The 'Freq. inicial' is 0 Hz, 'Freq. final' is 250 Hz, and 'Corte de freq.' is 2 Hz. The 'Captura automática' dropdown is set to 'Sempre'. The 'Pulsos/Rev.' is 1, and 'Médias' is 3. The 'Cálcmédia' dropdown is set to 'Média'. The 'Fator linear' is 0, and 'Unid. veloc. linear' is empty. The 'Referência de marca de velocidade' section has 'PONTO' set to 'Nenhum' and 'Relação' set to 1. The 'OK', 'Cancelar', and 'Ajuda' buttons are at the bottom.

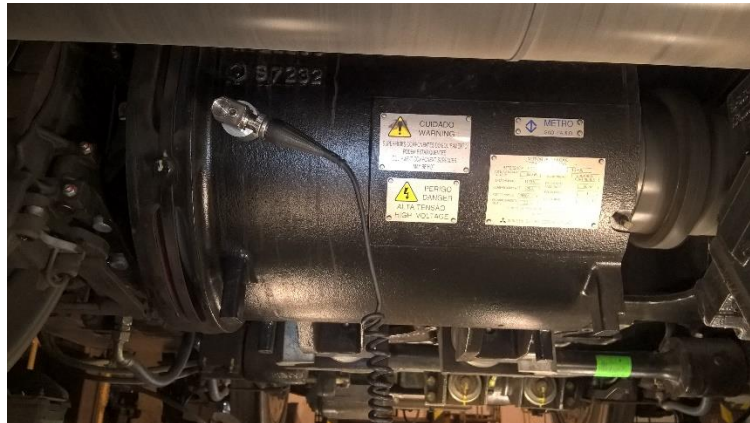
The 'Propriedades do PONTO' dialog box is shown with the 'Identificação' tab selected. The 'Nome' field is set to '1Av', and the 'Descrição' field is set to 'GMA1 Motor Axial Traseiro'. The 'Ativar coleta de dados' checkbox is checked. The 'Tipo de DAD' dropdown is set to 'Microlog Analyzer', and the 'Aplicação' dropdown is set to 'Vibração'. The 'Tipo de sensor' dropdown is set to 'Acelerômetro', and the 'Unidades' dropdown is set to 'mm/s'. The 'Localização' dropdown is set to 1, and the 'Orientação' dropdown is set to 'Axial'. The 'OK', 'Cancelar', and 'Ajuda' buttons are at the bottom.

### 3. ANÁLISE DOS RESULTADOS

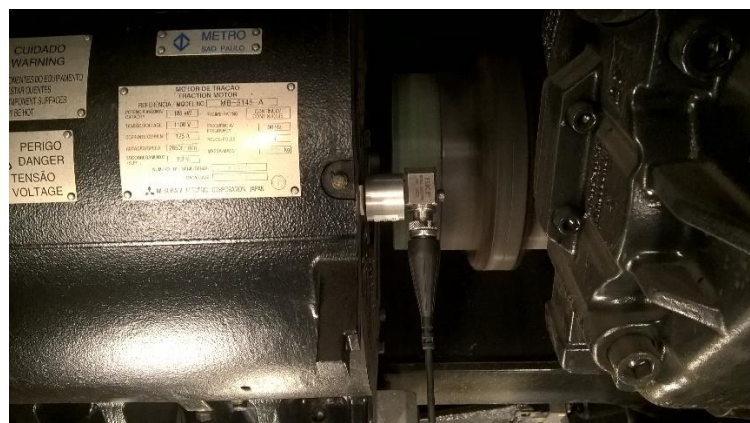
Para iniciar o trabalho de análise de vibração, foi preciso saber primeiramente as características gerais da máquina como categoria de classificação, tensão de alimentação, potência, corrente, velocidade, frequência de trabalho, etc., além do tipo e características do rolamento e após identificou-se a posição dos rolamentos na máquina e os melhores locais de medição onde o acelerômetro (sensor de contato) seria colocado para aquisição dos dados. No segundo momento, utilizando-se do software do sistema de Análise de Vibração que pode ser instalado em qualquer computador, foi configurado o banco de dados de medição de condição de máquina que consiste em uma estrutura hierárquica com conjuntos e pontos de medição, para cada trem foi traçada uma rota destes pontos incluindo todos os motores de tração e mancais de rodeiros. Após, esta rota foi transferida para o DAD (Dispositivo remoto de Aquisição de Dados), este dispositivo móvel ou remoto junto com o acelerômetro tem a finalidade de medir e gravar os dados de vibração. Estas informações agora contidas no DAD retornam para o software da Análise de Vibração, e identificando as frequências através do gráfico de espectros, estes dados de vibração finalmente são analisados.



*Medição Vertical do Motor de Tração*



*Medição Horizontal do Motor de Tração*



*Medição Axial do Motor de Tração*

#### 4. CONCLUSÕES

Este trabalho mostrou-se bastante importante pelo efeito que causou através das análises dos rolamentos: um motor com rolamento defeituoso foi removido e trocado, diversos

motores de tração com lubrificação deficiente foram lubrificados e nos mancais de rodeiros descobriram-se também problemas de lubrificação, neste caso ocorrido por infiltração de água, e após investigação mais profunda, foi identificado erro de processo na montagem do mancal, e devido ao trem estar em garantia, o fornecedor realizou o retrabalho em toda frota sem custos adicionais para o Metrô. Com certeza este resultado foi possível por termos domínio da técnica e realizarmos estas análises em tempo hábil.

## 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 5.1. Robert Skeirik - “Innovative Digital Technique for Detection of Bearing Faults on Critical and Slow Speed Machines” – 3º Congresso de Gerenciamento de Manutenção Preditiva- Belo Horizonte.
- 5.2. Todd Reeves - DoctorKnow, Application Paper - “Failure Modes of Rolling Element Bearing”.
- 5.3. TANDON N, NAKRA BC. Vibration and acoustic monitoring techniques for the detection of defects in rolling element bearings — a review. Shock Vibr Digest 1992;24(3):3– 11.
- 5.4. TANDON, N.; CHOUDHURY, A. , 1997. “Prediction of vibration amplitudes for defective rolling bearings”. Int Sound Vibr Digest, Volume 3, Number 2, Pages 20-25.
- 5.5. [http://www.cetre.com.br/portal/pdfs/apostila\\_lp.pdf](http://www.cetre.com.br/portal/pdfs/apostila_lp.pdf)
- 5.6. [http://pt.wikipedia.org/wiki/Manuten%C3%A7%C3%A3o\\_preditiva](http://pt.wikipedia.org/wiki/Manuten%C3%A7%C3%A3o_preditiva)

