

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ESTUDO COMPARATIVO ENTRE OS MÉTODOS DO VALOR DE PICO (PEAKVUE)
E DA DEMODULAÇÃO DE SINAIS DE VIBRAÇÃO (ENVELOPE) NA PREVISÃO DE
FALHAS EM ROLAMENTOS.

por

Mauricio Pereira Nichterwitz

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, Junho de 2013



Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Departamento de Engenharia Mecânica

ESTUDO COMPARATIVO ENTRE OS MÉTODOS DO VALOR DE PICO (PEAKVUE)
E DA DEMODULAÇÃO DE SINAIS DE VIBRAÇÃO (ENVELOPE) NA PREVISÃO DE
FALHAS EM ROLAMENTOS.

por

Mauricio Pereira Nichterwitz

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof^a. Dr^a. Thamy Cristina Hayashi
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Mecânica dos Sólidos

Orientador: Prof. Juan Pablo Raggio Quintas

Comissão de Avaliação:

Prof. Leticia Fleck Fadel Miguel

Prof. Edson Hikaro Aseka

Prof. Jakson Manfredini Vassoler

Porto Alegre, 17, Junho de 2013.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à minha mãe Marinelma, ao meu pai Paulo, a minha namorada Franciele e aos meus amigos pelo incondicional apoio e por sempre acreditarem em mim. Devo agradecer aos funcionários da CMPC Celulose Riograndense, em especial ao Wladimir Centeno por me auxiliar na coleta dos dados, trocar ideias sobre a análise de vibrações e estar sempre disposto para fazer mais uma medição, e também ao Antônio Silveira por permitir e apoiar este trabalho. Por fim agradeço ao meu orientador, Professor Juan Pablo Raggio Quintas pela disponibilidade de compartilhar seus conhecimentos e pela atenção e cordialidade despendida.

Nichterwitz, M. P. “**Estudo comparativo entre os métodos do valor de pico (Peakvue) e da demodulação de sinais de vibração (envelope) na previsão de falhas em rolamentos.**” 2013. 25 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

RESUMO

A técnica de análise de vibrações do PeakVue é apresentada, por sua desenvolvedora, como superior à técnica da demodulação do sinal de vibrações para detecção de falhas em rolamentos em manutenções preditivas, visando prever a falha e planejar o reparo do equipamento. Objetiva-se demonstrar se a técnica é realmente superior e em que situações, através de coletas de dados de equipamentos, operando em uma planta de produção de celulose, com indicativo de defeitos e sem indicativo de defeitos e fazendo a análise dos resultados. Por fim se conclui que a técnica do PeakVue é superior em baixas rotações (30 RPM) e as duas técnicas se equivalem para médias rotações (faixa de 1000 a 2000 RPM).

PALAVRAS-CHAVE: PeakVue, Demodulação, Rolamento, Vibração

Nichterwitz, M. P. **Comparative study between the methods of the peak value (PeakVue) and demodulation of vibration signals (envelope) in the prediction of bearing failures.** 2013. 25 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

ABSTRACT

The PeakVue vibration analysis technique is presented by its developer as better suited than demodulation for failures detection in bearings during predictive maintenance aimed to forecast failures and plan equipment repairs. This work main objective was to evaluate in which of several conditions this premise is true. In order to achieve this goal, data sampling obtained from equipments (with and without defect indicators) at a pulp production manufacturing plant followed by analyzes were done and the conclusions are shown. The PeakVue technique proved to be more appropriate at low rotation (30 RPM) and both techniques were found equivalent at medium rotation (1000-2000 RPM range).

KEYWORDS: PeakVue, Demodulation, Bearing, Vibration

ÍNDICE

	Pág.
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS.....	1
2.1. Objetivos Gerais.....	1
2.2. Objetivos Específicos.....	1
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	2
3.1. Manutenção Preditiva.....	2
3.2. Falhas em Rolamentos.....	2
3.3. Técnicas de diagnóstico.....	4
3.3.1. Envelope (Demodulação).....	5
3.3.2. Valor de Pico (PeakVue).....	6
4. METODOLOGIA.....	7
4.1. Equipamentos Analisados.....	7
4.2. Coletores de dados.....	9
4.3. Realização das medições.....	10
5. RESULTADOS.....	11
5.1. Equipamentos 1 (Redutores).....	11
5.2. Equipamentos 2 (Cilindros Secadores).....	12
5.3. Equipamentos 3 (Bombas).....	13
5.4. Análise dos Resultados.....	13
6. CONCLUSÃO.....	14
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	15
Anexo I – Informações dos rolamentos.....	16
Anexo II – Certificado de calibração do acelerômetro piezoelétrico.....	18
Apêndice I – Cálculo analítico das frequências de defeito do rolamento SKF 7313.....	19

1. INTRODUÇÃO

As empresas, devido a atual competitividade e exigência por resultados, buscam cada vez mais uma redução de custos e elevação de produtividade. Para tanto, o aumento da vida útil dos equipamentos, reduzindo perdas com paradas de produção e manutenções de ativos, é de essencial importância.

Até os anos 60 a prática comum era utilizar os equipamentos até apresentarem sérios problemas de desempenho ou até mesmo falharem, devido à causa de muitas falhas catastróficas, a manutenção planejada nos equipamentos críticos começou a ser utilizada. Tal manutenção preventiva realmente minimizou o número de falhas graves, porém a manutenção fixa e programada incorre em paradas de fabricação e inspeções muitas vezes bastante custosas.

A manutenção preventiva envolve cuidados rotineiros com o equipamento, como lubrificação e reposição de peças com desgaste excessivo, porém não prevê condições para previsão mais aprofundada de falhas e como evitar perda de produção. A manutenção preditiva se baseia no histórico passado do equipamento para prever quando um componente específico irá falhar. A manutenção preditiva pode apontar que um componente está em indicativo de falha e deve ser trocado prematuramente para evitar uma parada de produção. Ou seja, a manutenção preditiva é a manutenção preventiva executada no momento exato, detectado através de análises estatísticas e de sintomas.

Dentro da manutenção preditiva está a análise de vibrações. Segundo Price et al, 2001, o monitoramento de vibrações demonstra o comportamento macroscópico dentro da máquina.

Dentre os componentes de equipamentos os rolamentos tem grande importância devido a sua larga aplicação e possibilidade de defeitos. Conforme Nepomuceno, 1989, embora o custo destes componentes seja baixo em relação ao equipamento, a ocorrência inesperada de falha pode causar uma interrupção na produção e/ou danos catastróficos ao equipamento. Defeitos em componentes rotativos, como engrenagens, eixos e rolamentos induzem forças que geram impulsos periódicos que podem ser observados através de análise de vibrações.

Técnicas de processamento de sinal são utilizadas na manutenção preditiva para extrair informações que permitam correlacionar características do sinal com o estado do equipamento. As mais utilizadas, consideradas clássicas, segundo Arato Jr, 2004, são: análise por nível global de vibração, análise por espectro de vibração, média temporal síncrona, demodulação e diagrama de órbita, e agora mais recentemente análise por valor de pico (PeakVue).

PeakVue é um método de processamento de sinais desenvolvido pela empresa CSI (Computational Systems Incorporated), do grupo Emerson, que é apresentado como tendo evoluções frente ao método de demodulação de sinais. No trabalho se realizou, através de medições coletadas a partir de seis equipamentos, com três características diferentes, sendo três em indicativo de defeito e três em condições normais, a análise com os métodos da demodulação e do PeakVue, e após se procedeu a comparação dos resultados.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivos Gerais

Tem-se como objetivo do trabalho a detecção de defeitos em rolamentos valendo-se da técnica da análise de vibrações, empregado largamente em manutenção preditiva. Para tanto, foram analisados três casos em equipamentos distintos e empregado o método de análise do PeakVue e da demodulação de sinais de vibração (envelope).

2.2. Objetivos Específicos

- Evidenciar a importância da manutenção preditiva;
- Comparar os métodos do PeakVue e envelope de análise de vibrações;
- Corroborar a assertividade da detecção de defeitos por análise de vibrações;
- Comparar os resultados obtidos para diferentes equipamentos.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Manutenção Preditiva

Segundo Moubray, 2000, manter significa continuar em um estado existente, ou seja, a manutenção é um conjunto de técnicas utilizadas para que os ativos físicos (equipamentos, instalações, sistemas) cumpram ou preservem sua função ou funções específicas.

Para tanto, as primeiras gerações de manutenção utilizavam a manutenção corretiva não planejada, na qual as equipes de manutenção atuam em fatos que já ocorreram, onde não há tempo de preparar os componentes nem de planejar o serviço.

Com o passar dos anos se viu a importância do planejamento da manutenção e se evoluiu para a manutenção corretiva planejada, a manutenção preventiva e a manutenção preditiva.

A manutenção preditiva se baseia em prever o estado futuro de um equipamento ou sistema, verificando e analisando tendências de variáveis do equipamento, através de dados coletados ao longo do tempo. Dados estes que podem ser de vibração, temperatura, análise de óleo, termografia, ultrassom, entre outros. É caracterizada pela previsão da falha do equipamento, realizando coleta de informações com o equipamento em funcionamento. Segundo Moubray, 1997, a manutenção preditiva é a execução da manutenção no momento adequado, com finalidade de evitar a falha funcional e suas consequências.

Após, obtidos os dados indicativos de falha do equipamento através da manutenção preditiva, pode-se vir a utilizar a manutenção corretiva planejada, em que se programa o melhor momento para o processo parar, levando em conta: negociação de parada do processo produtivo, aspectos de segurança, garantia de ferramental, sobressalentes e recursos humanos.

Por ser uma manutenção de acompanhamento, a preditiva exige mão-de-obra qualificada e aparelhos e instrumentos de medição. Porém, seu aparente alto custo é plenamente recompensado por seus resultados. Evitando paradas desnecessárias, que trazem grandes prejuízos ao processo, assim como proporcionando uma diminuição de estoque de equipamentos e peças.

Segundo pesquisa realizada por Plant Performance Group (uma divisão da Technology for Energy Corporation), 1988 (apud Lima et al, 2006), onde foram pesquisadas 500 empresas de diversos setores, como, papel, celulose, energia, siderurgia, alimentício, entre outras, que afirmaram ter implementada a manutenção preditiva a no mínimo três anos em suas unidades, a manutenção preditiva resultou nos benefícios demonstrados na Tabela 3.1.1.

Tabela 3.1.1 - Benefícios gerados pela implantação da manutenção preditiva [Plant Performance Group, 1988 apud Lima et al, 2006].

Atividade	% Benefício
Custos de manutenção	Redução de 50 a 80 %
Falhas nas máquinas	Redução de 50 a 60 %
Estoque reposição	Redução de 20 a 30 %
Horas extras manutenção	Redução de 20 a 50 %
Tempo paradas de máquinas	Redução de 50 a 80 %
Vida dos equipamentos	Aumento de 20 a 30 %
Lucratividade	Aumento de 25 a 60 %

3.2. Falhas em Rolamentos

Como qualquer componente, os rolamentos apresentam desgaste pelo tempo. Segundo Nepomuceno, 1999, um rolamento pode apresentar falha prematura por uma série de razões, entre elas:

- Lubrificação inadequada: lubrificante escasso permitindo contato entre partes do rolamento, ou, perda das propriedades do lubrificante, ou, lubrificante inadequado;

- Montagem incorreta: pressão para montagem no anel inadequada, deslocamento excessivo em assento cônico, sobrecarga com o rolamento parado;
- Retentores inadequados: retentores que permitem entrada de partículas para dentro do rolamento ou que se deterioram contaminando o rolamento;
- Desalinhamento: eixo torto ou empenado, corpos estranhos entre o anel e o assento, rolamentos martelados;
- Passagem de corrente elétrica: diferença de potencial entre as pistas e os elementos girantes do elemento;
- Vibrações externas: rolamentos fora de operação submetidos a vibrações provenientes de outros equipamentos vizinhos;
- Defeitos de fabricação: defeitos provenientes do processo ou material de fabricação das pistas, gaiola ou elementos rolantes do rolamento;
- Fadiga: proveniente do contato dos elementos do rolamento após certo número de ciclos.

Porém, mesmo não ocorrendo falha prematura o rolamento está sujeito a falhas por fadiga natural. À medida que os elementos girantes se movimentam passam por uma determinada região, provocando tensões cíclicas de cisalhamentos na camada abaixo da pista.

Segundo Harris, 1991 e Juvinall e Marshek, 1991 as tensões cíclicas de cisalhamento provocam micro fissuras, surgidas em pontos de pouca resistência, ou onde há defeitos do material como inclusões de não metálicos. Essas micro fissuras evoluem para superfície, pista, onde surgirão trincas. Essas trincas com a passagem contínua dos elementos rolantes evoluirão para orifícios (pits) e/ou descascamentos (spalls) até que ocorra uma falha no rolamento que impossibilite sua utilização. Fenômeno este que pode ocorrer em qualquer elemento do rolamento que sofre carregamento alternado (anéis externo e interno e elementos rolantes)

Na Figura 3.2.1 pode-se observar o surgimento de uma falha na pista do anel externo do rolamento:

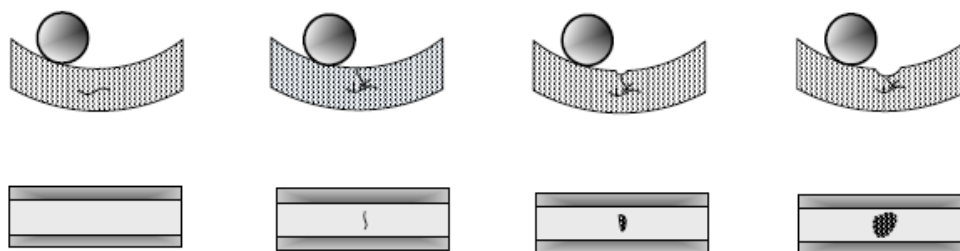


Figura 3.2.1 - Surgimento de uma falha por fadiga em rolamento [Bezerra e Pederiva, 2004].

Quando a superfície com defeito de um elemento do rolamento entra em contato com outra superfície do rolamento, este choque produz um impulso que excita ressonâncias no rolamento e na máquina. Segundo McFadden e Smith, 1984, estes impulsos irão ocorrer periodicamente com uma frequência que é determinada, unicamente, pela localização do defeito, sendo ele na pista interna, pista externa, elemento girante ou gaiola.

As frequências características de falhas em rolamentos são não síncronas, ou seja, não são múltiplas inteiras da velocidade de rotação do eixo. Esta característica permite a sua identificação mesmo sem a parada do equipamento e abertura do rolamento.

As frequências básicas de defeitos em rolamentos podem ser calculadas utilizando as dimensões ilustradas na Figura 3.2.2 juntamente com as seguintes equações:

Frequência de defeito em gaiola (FTF – Fundamental Train Frequency):

$$FTF = \frac{S}{2} \cdot \left(1 \pm \frac{d}{D} \cdot \cos \phi \right) \quad (3.2.1)$$

(onde o sinal negativo deve ser utilizado para pista externa estacionária e o sinal positivo para pista interna estacionária)

Frequência de defeito no elemento rolante (BSF – Ball Spin Frequency):

$$BSF = \frac{S}{2} \cdot \frac{D}{d} \cdot \left[1 - \left(\frac{d}{D} \cdot \cos \phi \right)^2 \right] \quad (3.2.2)$$

Frequência de defeito na pista interna (BPFI – Ball Pass Frequency Inner Race):

$$BPFI = \frac{S \cdot n}{2} \cdot \left(1 + \frac{d}{D} \cdot \cos \phi \right) \quad (3.2.3)$$

Frequência de defeito na pista externa (BPFO – Ball Pass Frequency Outer Race):

$$BPFO = \frac{S \cdot n}{2} \cdot \left(1 - \frac{d}{D} \cdot \cos \phi \right) \quad (3.2.4)$$

Onde:

$$S = S_i - S_e$$

S_e : frequência de rotação da pista externa

S_i : frequência de rotação da pista interna

d : diâmetro dos elementos rolantes

D : diâmetro primitivo

n : número de elementos rolantes

ϕ : ângulo de contato

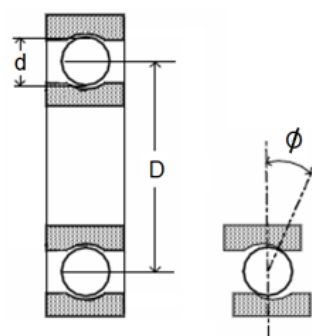


Figura 3.2.2 - Dimensões utilizadas para cálculo das frequências de defeito.

As frequências características são normalmente expostas em ordens de vibração, sendo que a primeira ordem de vibração é a frequência de rotação do eixo do equipamento, a segunda ordem de vibração é igual a duas vezes a frequência de rotação do eixo do equipamento. Ordens de vibração são muito utilizadas, pois fornecem todas frequências múltiplas do defeito e tem grande significância para equipamentos com variação na velocidade de rotação, pois a frequência de defeito varia conforme a velocidade do eixo é alterada.

Por exemplo, um equipamento com rotação de 1200 RPM tem uma frequência de 20 Hz, ou seja, 1 ordem é igual a 20 HZ. Caso se tenha um defeito em 0,4 ordem aparecerá picos de amplitude nas frequências 8 Hz, 16 Hz, 24 Hz. Já se a velocidade for diminuída para 900 RPM, 15Hz, os picos aparecerão em 6 Hz, 12Hz, 18Hz.

3.3. Técnicas de diagnóstico

Para a detecção de falhas em estágios iniciais, uma diversidade de técnicas e instrumentos foram desenvolvidos, dependendo da faixa de frequências em que a análise de vibrações será realizada. Algumas técnicas são mais adequadas a altas faixas de frequências e outras a médias e baixas. As técnicas que analisam a zona de alta faixa de frequência são baseadas na excitação. A elevação da faixa de frequência é originada da excitação de

frequências naturais características do rolamento ou estrutura, devido à falha do rolamento. A falha no rolamento age similarmente a uma batida em um sino, cada elemento rolante que passa pela falha é uma batida que gera dois sinais, um de baixa e um de alta frequência. A alta frequência é gerada pela ressonância do rolamento e/ou estrutura.

Quando um rolamento gira, com uma velocidade de rotação constante, esses pulsos são gerados periodicamente e as frequências são as características de defeito, como se pode observar na Figura 3.3.1.

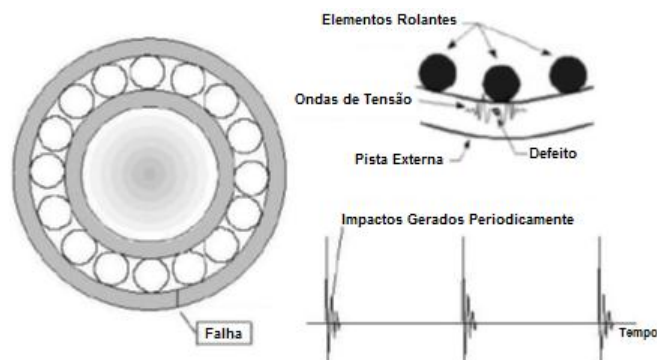


Figura 3.3.1 - Representação das ondas de impacto geradas pelos elementos rolantes causando falha no rolamento [Saavedra e Estupiñan, 2002].

As técnicas mais utilizadas para análise relacionada à excitação das frequências naturais são a do envelope ou demodulação e a do valor de pico ou PeakVue. Técnicas que serão explanadas posteriormente neste trabalho.

Na análise de altas frequências há duas principais dificuldades, a primeira é a baixa amplitude dos impactos de alta frequência comparada com os componentes da baixa frequência. A segunda é a dificuldade de identificar as frequências características de defeito em rolamentos, por conta dos ruídos e da baixa resolução espectral.

Para facilitar a tarefa de diagnóstico é necessário isolar as vibrações de alta frequência das demais utilizando um filtro passa alta ou filtro passa banda em torno das frequências naturais de excitação. Então a vibração gerada apenas pelos impactos na falha pode ser analisada identificando as frequências de defeito e avaliando sua severidade. Para tanto se utiliza duas técnicas, a do envelope ou a do PeakVue.

3.3.1. Envelope (Demodulação)

Segundo Scheffer e Girdhar, 2004, a técnica do envelope é composta de um conjunto de procedimentos aplicados ao sinal, conforme segue e é apresentado na Figura 3.3.1.1:

- Aplicação da transformada de Fourier ao sinal (FFT), no intuito de identificar uma faixa de frequências onde houve elevação em relação a medidas de picos de frequência, coletadas anteriormente. A elevação ocorre devido à excitação de frequências naturais características do rolamento ou estrutura, devido à falha no rolamento.
- Aplicação de filtro passa banda ou passa baixa ao sinal, no intuito de eliminar baixas frequências de alta amplitude, que estão geralmente relacionadas a desalinhamentos e desbalanceamentos.
- Aplicação da transformada de Hilbert, no intuito de obter o envelope, Figura 3.3.1.2, do sinal do defeito.
- Aplicação da FFT ao envelope, no intuito de obter as frequências dos defeitos.

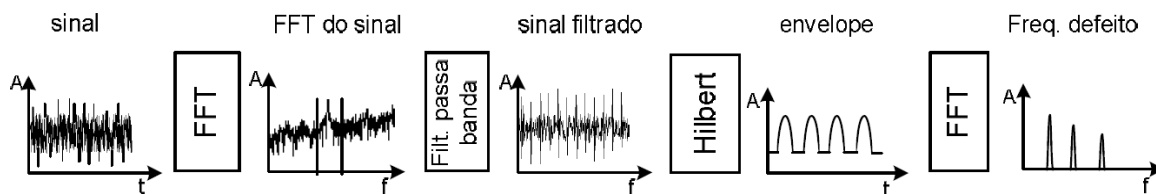


Figura 3.3.1.1 Procedimento adotados na metodologia da demodulação [Bezerra e Pederiva, 2004].

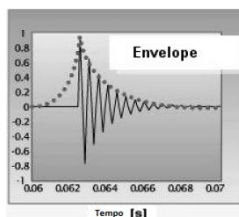


Figura 3.3.1.2 - Envelopamento do espectro de vibração [Saavedra e Estupiñan, 2002].

3.3.2. Valor de Pico (PeakVue)

Segundo Robinson e Berry, 2001 e Scheffer e Girdhar, 2004, a técnica do PeakVue, assim como na demodulação, isola as zonas de ressonância pela passagem de filtro passa alta ou passa banda, para a remoção de baixas frequências. Após, o sinal passa por um conversor analógico-digital, então cada amostra é analisada e apenas aos níveis de amplitude que excedam um valor especificado são atribuídos sinais digitais.

Ou seja, se o analisador está programado para coletar 100 amostras do sinal analógico e se houver fortes impactos, se obterá 100 valores digitais de pico, Figura 3.3.2.1. A forma de onda digital no domínio tempo só terá os maiores valores positivos, um por amostra. Se não houver defeitos, não haverá impulsos elevados, e apenas o ruído de baixa amplitude (a partir do sinal ou instrumento) irá existir, não sendo assim transformado em sinal digital. Um pulso de um impacto, devido a um defeito de rolamento ou de engrenagem tem uma duração de tempo muito curta e tende a ser periódico, por conseguinte, só haverá valores de pico elevados nas amostras onde o pulso ocorre.

Por fim, algoritmo FFT (transformada de Fourier) processa a informação digital e constrói o espectro, que apresenta apenas os picos fundamentais e harmônicas com frequências iguais as dos pulsos.

Com PeakVue, o sinal é extraído a partir de dados de alta frequência, maior ou igual a frequência de Nyquist¹, porém não é retificado ou envelopado por um filtro passa baixa. Então, o bloco de dados digitais consiste nos máximos valores absolutos da forma de onda no domínio tempo, em cada incremento de tempo definido pela taxa de amostragem. Por isso, a análise dos valores representativos da forma de onda no tempo é a análise dos valores de pico.

¹ Segundo Nyquist, 1928, um sinal precisa ser amostrado pelo menos duas vezes em cada ciclo de variação, isto é, a frequência de amostragem (frequência de Nyquist) precisa ser no mínimo o dobro da maior frequência presente no sinal. Se não for observado o critério, os sinais de mais alta frequência serão erroneamente registrados como de baixa frequência, fenômeno chamado de alias. Como exemplo deste fenômeno se tem a impressão da roda girando no sentido inverso que se observa na televisão.

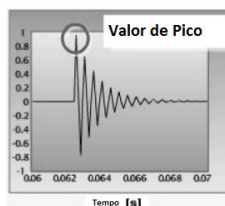


Figura 3.3.2.1 - Valor de pico dentro de uma amostra capturada em um Δt [Saavedra e Estupiñan, 2002].

4. METODOLOGIA

4.1. Equipamentos Analisados

Foram escolhidos para análise equipamentos que são de alta criticidade na fábrica e estavam em aumento do nível global de vibrações, observado pelo parâmetro de velocidade de vibrações em inspeções de rotina, segundo Garcia, 2005, o parâmetro velocidade de vibração tem sido escolhido como unidade de medida para indicar a severidade da vibração, e que tenham um equipamento replicante, de diferentes formas construtivas e velocidades de rotação, no intuito de se analisar uma maior gama de frequências de vibrações.

O primeiro tipo de equipamentos analisados (equipamentos 1) são redutores de velocidade. Dispositivos mecânicos para redução da velocidade e aumento do torque, que tem como principais componentes: eixo de entrada e saída, rolamentos, engrenagens e carcaça.

Foram analisados os redutores de acionamento da prensa Nipcoflex, conforme se pode observar na Figura 4.1.1, numerados na fábrica como 465-27-349 e 465-27-350.

Os redutores em questão são da marca Flender e tem como função acionar a terceira prensa da máquina de celulose, operam com uma rotação de aproximadamente 1150 RPM no eixo de entrada, local onde foi realizada a medição, e caso parem de funcionar cessa a produção de celulose. Operam com uma relação de transmissão de aproximadamente 9,6 e possuem rolamentos da marca Koyo, modelo T7FC075. Mais detalhes do rolamento podem ser vistos no Anexo I. As frequências de defeito deste rolamento estão representadas na Tabela 4.1.1.



Figura 4.1.1 – Redutores, 465-27-350 na esquerda e 465-27-349 na direita.

O segundo tipo de equipamentos analisados (equipamentos 2) são cilindros secadores de celulose. Equipamentos que tem a função de secar a folha de celulose molhada, através de aquecimento. O aquecimento é realizado através de vapor saturado, que devido à energia fornecida à celulose torna-se condensado, que é retirado por um sistema de sifão, conforme

pode ser observado na Figura 4.1.2. Caso os cilindros secadores parem de funcionar, a máquina de secagem de celulose deixa de operar por diversas horas, impactando em grandes prejuízos financeiros.

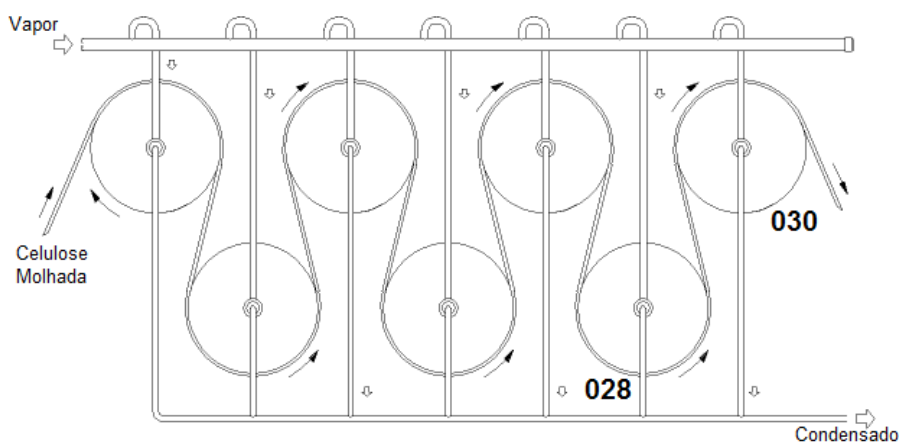


Figura 4.1.2 - Esquema de secagem de celulose.

Os cilindros secadores medidos foram os de número 028 e 030 do 3º grupo secador da máquina de secagem 465-28-031, que operam a uma velocidade variável, porém no momento da medição estavam a 30 RPM. Podem ser visualizados os cilindros na Figura 4.1.3.

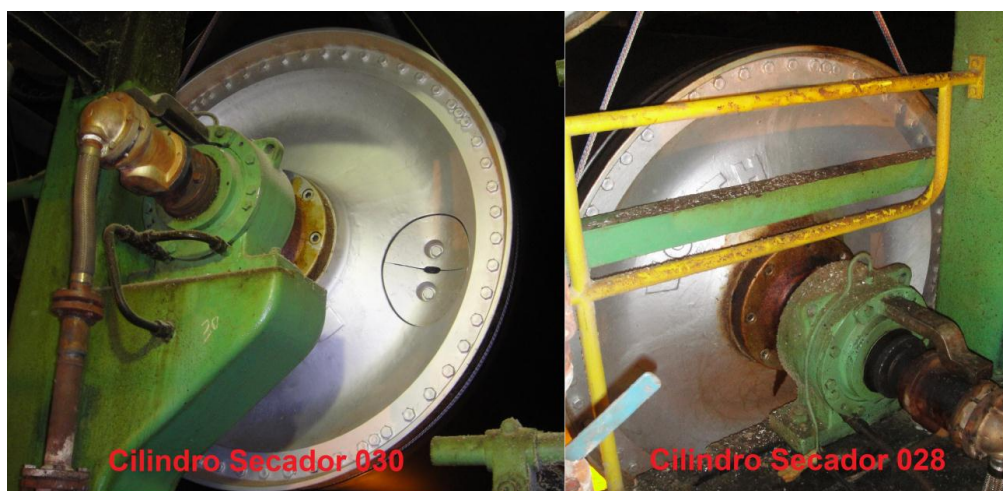


Figura 4.1.3 - Cilindros Secadores, 030 na esquerda e 028 na direita.

Os rolamentos utilizados nos mancais dos cilindros são da marca Koyo, modelo NN 3044. As frequências de defeito deste rolamento estão representadas na Tabela 4.1.1. Mais detalhes do rolamento podem ser vistos no Anexo I.

O terceiro tipo de equipamentos analisados (equipamentos 3) são bombas centrífugas. Equipamentos que tem a função de transferir energia, fornecida por um motor elétrico ou a combustão, para um fluido através de um ou mais rotores.

Foram analisadas as bombas de envio de celulose para a fábrica de papel, Figura 4.1.4, através do celuduto, caso as bombas parem de funcionar a alimentação da máquina de produção de papel é suspensa e dependendo dos níveis dos tanques de armazenamento a produção de papel pode parar, acarretando prejuízos. No momento da medição as bombas, que são numeradas na fábrica como 465-34-109 e 465-34-110, operavam com uma rotação de 1790 RPM.



Figura 4.1.4 - Bombas, 465-34-109 na esquerda e 465-34-110 na direita.

Os rolamentos utilizados nos mancais das bombas são da marca SKF modelo 7313. Mais detalhes do rolamento podem ser vistos no Anexo I. As frequências de defeito deste rolamento estão representadas na Tabela 4.1.1.

Na Tabela 4.1.1 se pode observar as frequências características de defeitos dos rolamentos, encontradas no banco de dados do software AMS Suite: Machinery Health Manager da empresa Emerson, também se pode verificar as frequências características de defeito do rolamento SKF 7373 calculado analiticamente. Os cálculos explicitados se encontram no Apêndice I.

Tabela 4.1.1 - Dados e frequências de defeitos em rolamentos, em ordens, obtidos do banco de dados do software AMS Suite: Machinery Health Manager da empresa Emerson e calculado analiticamente para um rolamento.

Equipamento	Marca	Modelo	Nº Elementos Rolantes	Defeito de gaiola (FTF)	Defeito em elementos rolantes (BSF)	Defeito na pista externa (BPFO)	Defeito na pista interna (BPFI)
Bombas	SKF	7313	12	0,405	2,075	4,859	7,141
Calculado Analiticamente	SKF	7313	12	0,399	1,822	4,790	7,209
Redutores	KOYO	T7FC075	19	0,440	3,561	8,361	10,640
Cilindros Secadores	KOYO	NN 3044	26	0,452	5,193	11,760	14,240

4.2. Coletores de dados

Para coleta dos dados de vibração pode ser utilizada uma diversidade de equipamentos, dentre os quais podemos citar Commtest Vb8, SKF Microlog CMXA 75, Emerson CSI 2130, Prüftechnik VIBXPRT.

Foi utilizado o coletor CSI 2130 da fabricante Emerson, que pode ser observado na Figura 4.2.1.



Figura 4.2.1 – A - Coletor de dados da marca Emerson CSI 2130 e B - Acelerômetro Piezoelétrico, utilizados nas coletas de dados.

Utilizou-se como sensor um acelerômetro ICP (Sensor de circuito piezoelétrico integrado). Os dados de incerteza de medição do sensor estão explicitados no certificado de calibração apresentado no Anexo II.

4.3. Realização das medições

Como são realizadas inspeções de rotina (preditiva) por técnicos qualificados, se observou aumentos nos níveis globais de vibração do redutor 465-27-349, do cilindro secador 028 e da bomba 465-34-110. Motivo da escolha destes equipamentos para realização do trabalho.

As medições foram realizadas com auxílio de um técnico especializado, Figura 4.3.1, primeiramente no equipamento com indicativo de defeito pelo método do PeakVue e da demodulação e logo em seguida no seu semelhante (e.g. cilindro secador 028 e 030) pelos dois métodos citados, no intuito de realizar uma comparação posterior.



Figura 4.3.1 - Técnico especializado realizando a medição de vibrações no cilindro secador 028.

Para análise das medições foi utilizado o software AMS Suite: Machinery Health Manager da empresa Emerson, no qual se seta os parâmetros de coleta para utilização do CSI 2130. Após a medição os dados são descarregados no computador e o software AMS trata os dados, plotando gráficos e realizando uma superposição das frequências características de defeito dos rolamentos, existentes em seu banco de dados, com os gráficos gerados a partir dos dados coletados. Dando assim condições do operador identificar qual defeito está ocorrendo no

equipamento. O fluxo de operação e interface do software pode ser visto resumidamente na Figura 4.3.2.

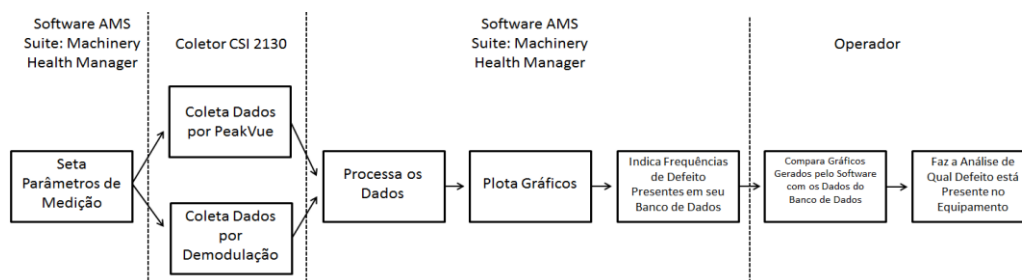


Figura 4.3.2 - Fluxo de operação e interface do software AMS Suite: Machinery Health Manager.

O software também mantém registro das medições realizadas anteriormente, permitindo assim a realização de uma análise por tendências, avaliando se a vibração está se acentuando ou está estagnada.

A tela de comparação entre gráficos do software AMS Suite: Machinery Health Manager pode ser vista na Figura 4.3.3.

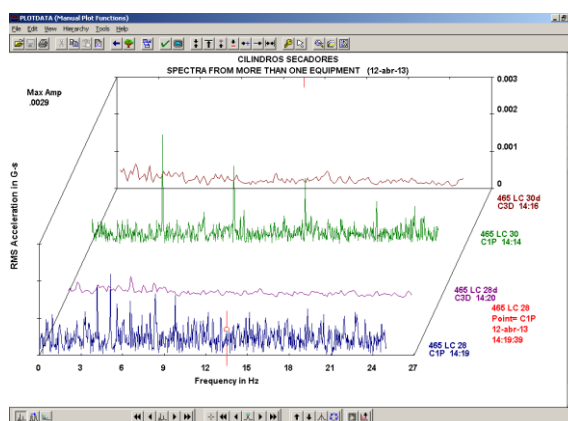


Figura 4.3.3 - Tela de comparação entre gráficos do software AMS Suite: Machinery Health Manager, utilizado nas análises.

5. RESULTADOS

5.1. Equipamentos 1 (Redutores)

Como se pode observar na Figura 5.1.1, para os redutores, com velocidade de rotação de 1150 RPM, se encontrou um indicativo de defeito tanto pelo método da demodulação, quanto pelo método do PeakVue para o equipamento 349. Já o equipamento 350 apresenta um espectro “limpo”, com baixa amplitude, nos dois métodos de análise.

O redutor 349 está apresentando picos de frequência em 8,355 ordens, conforme Figura 5.4.1, o que indica, em comparação com a Tabela 4.1.1 de defeitos em rolamentos que se tem um defeito na pista externa do rolamento (BPFO).

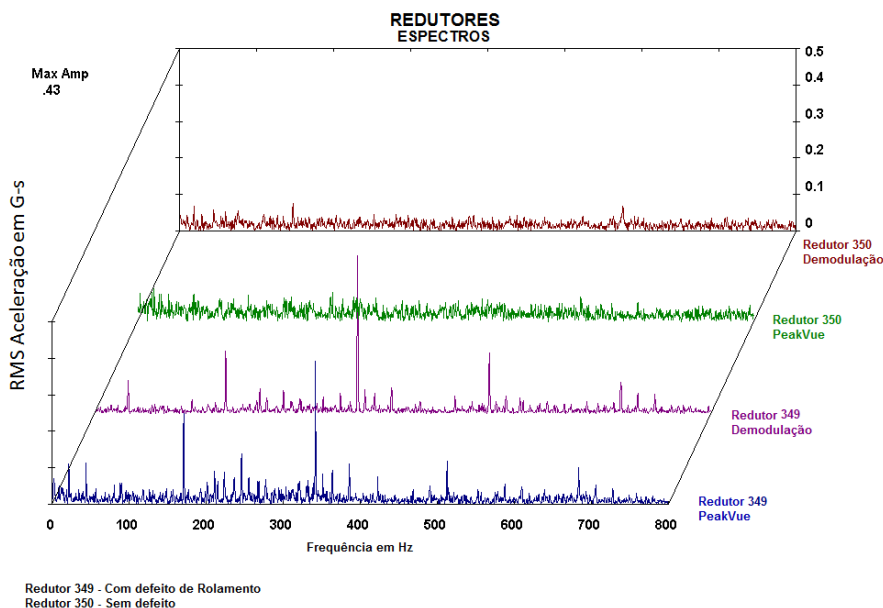


Figura 5.1.1 - Espectros de vibração dos redutores 465-27-350 e 465-27-349 com velocidade de 1150RPM.

5.2. Equipamentos 2 (Cilindros Secadores)

Como se pode observar na Figura 5.2.1, para os cilindros secadores, com velocidade de rotação de 30 RPM, é evidenciado um indicativo de defeito no equipamento 030 pelo método do PeakVue, com picos bem evidenciados no espectro, já o espectro do equipamento em boas condições apresenta vibrações aleatórias. No método da demodulação os espectros dos dois cilindros se parecem muito, não havendo assim nenhum indício de defeito dos equipamentos.

O cilindro secador 030 está apresentando picos de frequência em 10,570 ordens, conforme Figura 5.4.1, o que nos indica, em comparação com a Tabela 4.1.1 de defeitos em rolamentos que temos um defeito em pista externa (BPFO).

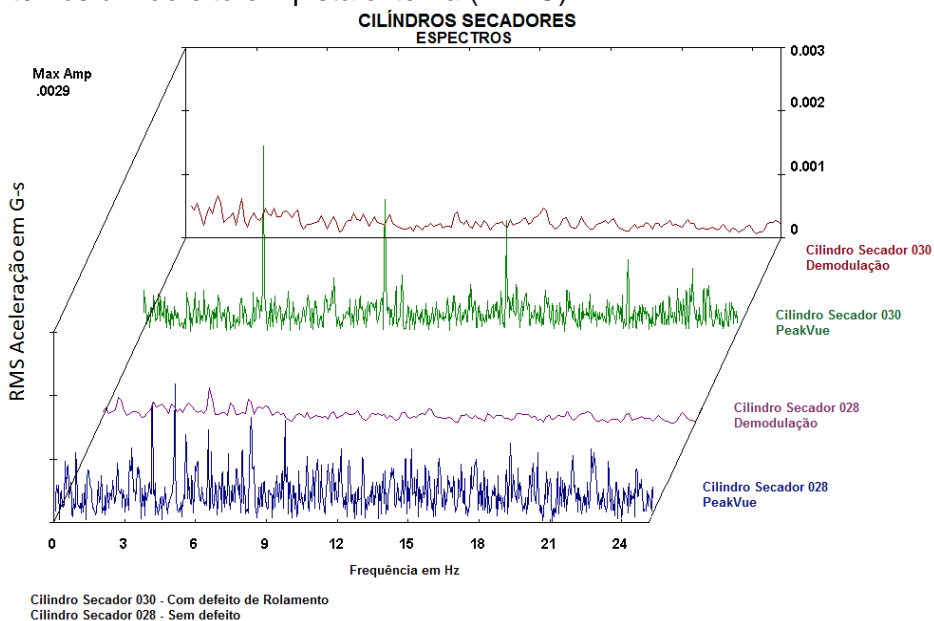


Figura 5.2.1 - Espectros de vibração dos cilindros secadores 028 e 030 com velocidade de 30RPM.

5.3. Equipamentos 3 (Bombas)

Como se pode observar na Figura 5.3.1, para as bombas, com velocidade de rotação de 1790 RPM, se encontrou um indicativo de defeito tanto pelo método da demodulação, quanto pelo método do PeakVue para o equipamento 110. Já o equipamento 109 apresenta um espectro “limpo”, com baixa amplitude, nos dois métodos de análise.

A bomba 110 está apresentando picos de frequência em 7,106 ordens, conforme Figura 5.4.1, o que nos indica, em comparação com a Tabela 4.1.1 de defeitos em rolamentos que temos um defeito na pista interna do rolamento (BPFI).

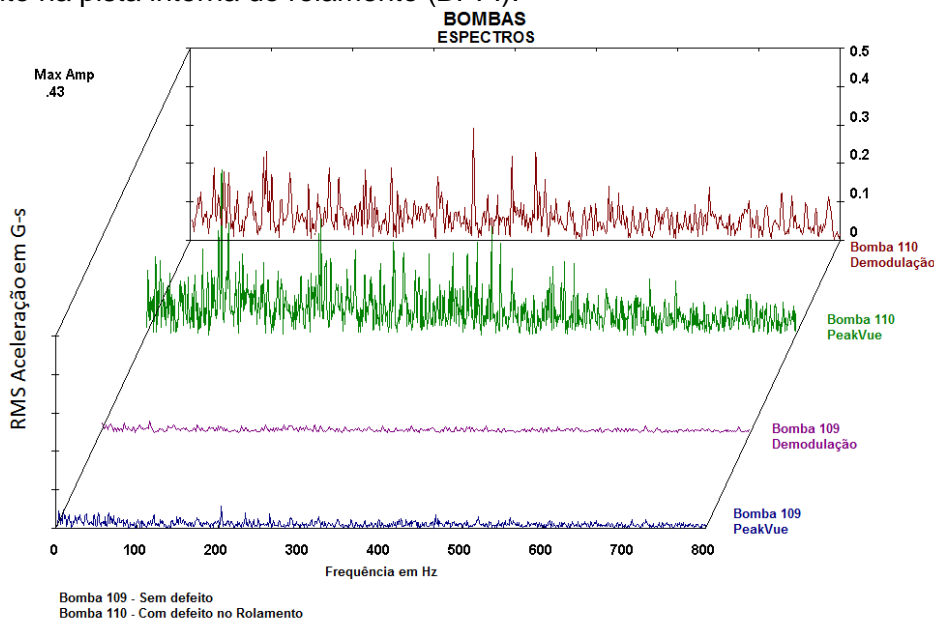


Figura 5.3.1 - Espectros de vibração das bombas 465-34-109 e 465-34-110 com velocidade de 1790RPM.

5.4. Análise dos Resultados

Se constata que para os redutores (1150 RPM) e para as bombas (1790 RPM) os métodos da demodulação e do PeakVue se comportam de forma muito satisfatória, apresentando picos nos espectros de frequência dos equipamentos com indicativo de defeito e mantendo o espectro de frequência limpo para os equipamentos sem indicativo de defeito, além do mais os dois métodos evidenciam de forma clara as ordens de defeito dos rolamentos, indicando qual falha é esperada.

Já para os cilindros secadores (30 RPM) se constatou uma diferença entre os métodos, onde o PeakVue passa de um espectro de frequência aleatório no equipamento sem indicativo de falha para um espectro de frequência com picos bem definidos no equipamento com indicativo de falha. Já o método da demodulação não apresenta alguma diferença significativa entre os espectros de frequência dos equipamentos com indicativo de falha e do equipamento em condições normais. O defeito na pista externa (BPFO) só pode ser constatado pelo método do PeakVue.

Na Figura 5.4.1 se pode observar os espectros de frequência de vibração com os picos especificados em ordens e entre parênteses em frequência identificando as frequências de defeito, foram utilizados os gráficos obtidos através do método do PeakVue para diagnóstico de qual defeito está se apresentando nos rolamentos.

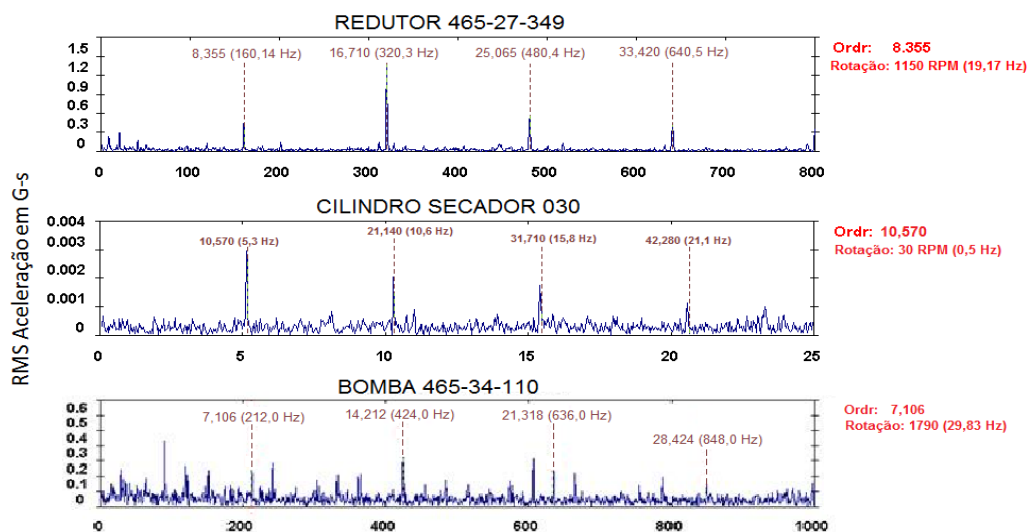


Figura 5.4.1 - Espectros de frequência dos equipamentos defeituosos pelo método do PeakVue identificando as frequências de defeito.

Na Tabela 5.4.1 se pode observar a comparação das frequências características de defeito de cada rolamento analisado obtido do banco de dados do software AMS Suite: Machinery Health Manager comparado com as frequências encontrados em cada um dos equipamentos com indicativo de defeito. Para as medições foi utilizado o método do PeakVue.

Tabela 5.4.1 - Comparação dos resultados de frequência de defeito encontrados pelo método do PeakVue com as apresentadas no banco de dados do software AMS.

Equipamento	Marca	Modelo	Defeito encontrado	Frequência de defeito - banco de dados	Frequência de defeito medida
Bomba -110	SKF	7313	BPFI	7,141	7,106
Redutor - 349	KOYO	T7FC075	BPFO	8,361	8,355
Cilindro Secador - 030	KOYO	NN 3044	BPFO	11,760	10,570

6. CONCLUSÃO

No presente trabalho fica evidente a importância da manutenção preditiva na indústria atualmente, através dela se podem observar defeitos incipientes e realizar uma preparação para o reparo ou troca do equipamento.

Foram encontrados defeitos em rolamentos em todos os casos que apresentavam aumento no nível global de vibrações, defeitos estes que podem ser acompanhados para apreciação de uma tendência de agravamento e previsão de falha. Assim, os responsáveis pelos suprimentos da fábrica tem tempo para comprar os itens necessários para troca, a gerência e o planejamento podem programar uma parada e além do mais, os mecânicos podem se preparar e estimar quanto tempo e qual o ferramental que necessitarão para realizar o reparo.

Quanto aos métodos de análise, se mostraram equivalentes para médias rotações, faixa de 1000 a 2000 RPM, evidenciando claramente falha em rolamentos e indicando qual a parte do rolamento está danificada. Porém, para uma baixa rotação, 30 RPM, o método do PeakVue foi o único que se mostrou eficiente, mostrando claramente diferenças entre os espectros do equipamento em boas condições e com indicativo de falha. O método da demodulação não se mostrou confiável para baixas rotações, pois não evidenciou diferenças entre os espectros de vibração dos equipamentos analisados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Arato JR., A.; **“Manutenção Preditiva Usando Análise de Vibrações.”**, Editora Manole Ltda, 1ª edição., 2004.

Bezerra, R. A., Pederiva, R.; **“Detecção de Falhas em Rolamentos por Análise de Vibração”**, Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas - S.P. Brasil, 2004.

Garcia, M.S.; **“Análise de Defeitos em Sistemas Mecânicos Rotativos a Partir da Monitoração de Vibrações”**, Tese de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro - R.J. Brasil, 2005.

Harris, T. A.; **“Rolling Bearing Analysis”**, John Wiley & Sons, USA, 3ª ed, 1991.

Juvinall, R. C., Marshek, K. M.; **“Fundamentals of Machine Component Design”**, New York, John Wiley & Sons, U.S.A., 2ª ed, 1991.

Lima, W. C. Lima, C. R. C., Salles, A. A., **“Manutenção Preditiva, o Caminho para a Excelência – Uma Vantagem Competitiva”**, XIII, SIMPEP, Bauru, SP, Brasil, 06 a 08 de novembro de 2006.

McFadden, P. D. and Smith, J. D., **“Vibration Monitoring of Rolling Element Bearings by High Frequency Resonance Technique a Review”**, Tribology International , Vol. 17, pp. 3-10, 1984.

Moubray, J.; **“Reliability centred maintenance.”**, 2 ed. Oxford: Butterworth- Heinemann, 1997.

Moubray, J.; **“RCM II: a manutenção centrada em confiabilidade.”** Grã Bretanha: Biddles Ltd., Guilford and King's Lynn. Edição Brasileira, 2000.

Nepomuceno, L. X.; **“Técnicas de manutenção preditiva”**, Editora Edgard Blücher, 1989.

Nyquist, H.; **“Certain topics in Telegraph Transmission Theory”**, Transactions of the American Institute of Electric Engineers, 47, 617, 1928.

Price, E. D., Sperring, T. P., Roylance B. J., Lee, A. W.; Friswell, M. I.; **“Sensor Fusion for Condition Monitoring ”**, Condition Monitoring, Oxford, 2001.

Robinson, J.C, Berry, J.E **“Description Of Peakvue and Illustration of Its Wide Array of Applications in Fault Detection And Problem Severity Assessment”**, Emerson Process Management Reliability Conference, 2001.

Saveedra, P., Estupiñan, E. **“Diagnostic Techniques for the Vibration Analysis of Bearings”**, Documento interno, Universidad de Tarapacá y Universidad de la Concepción, Chile, 2002.

Sheffer, C., Ghirdar, P., **“Practical Machinery Vibration Analysis and Predictive Maintenance”**, Editora Elsevier, 2004

Anexo I – Informações dos rolamentos

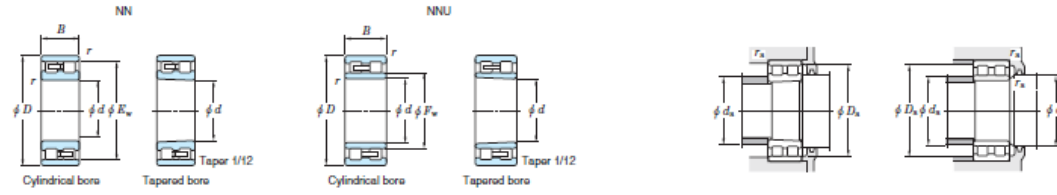
Single-row tapered roller bearings
metric series
d (70)~(75) mm

<i>d</i>	Boundary dimensions (mm)					Basic load ratings (kN)		Limiting speeds (min ⁻¹)		Bearing No. ¹⁾	Dimension series to ISO355 (Bearing)	Load center (mm)	Mounting dimensions (mm)										Constant <i>e</i>	Axial load factors		(Metric) Mass (kg)
	<i>D</i>	<i>T</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>r</i> min.	<i>C_r</i>	<i>C_{0r}</i>	Grease lub.	Oil lub.				<i>d_a</i> min.	<i>d_b</i> max.	<i>D_a</i> max.	<i>D_b</i> min.	<i>S_a</i> min.	<i>S_b</i> min.	<i>r_a</i> max.	<i>r_b</i> max.	<i>Y₁</i>	<i>Y₂</i>				
70	125	33.25	31	24	2	1.5	157	212	3100	4100	—	32.6	80	80	116.5	104	120	4	9.5	2	1.5	0.55	1.10	0.60	1.05	
	125	33.25	31	27	2	1.5	169	225	3100	4100	3EC	29.2	80	80	116.5	108	119	4	6	2	1.5	0.42	1.43	0.79	1.71	
	125	41	41	32	2	1.5	206	294	3100	4100	3EE	31.2	80	79	116.5	107	120	7	9	2	1.5	0.41	1.47	0.81	2.16	
	130	43	42	35	3	2.5	233	319	3000	4000	T2ED070	2ED	30.2	84	81	118	111	123	1	1	2.5	2	0.33	1.80	0.99	2.48
	140	39	35.5	27	3	3	177	242	2400	3400	T7FC070	7FC	46.5	84	82	126	106	133	5	12	2.5	2.5	0.87	0.69	0.38	2.64
	140	52	51	43	5	3	264	382	2900	3800	T4FE070	4FE	37.7	92	82	126	111	133	7	9	4	2.5	0.45	1.34	0.74	3.69
	150	38	35	25	3	2.5	197	235	2300	3200	30314DJR	7GB	47.1	84	84	138	118	142	4	13	2.5	2	0.83	0.73	0.40	2.97
	150	38	35	30	3	2.5	224	256	2700	3600	30314CR	—	37.0	84	87	138	123	141	6	8	2.5	2	0.55	1.10	0.60	3.10
	150	38	35	30	3	2.5	230	273	2600	3500	30314JR	2GB	30.5	84	89	138	130	140	4	8	2.5	2	0.35	1.74	0.96	3.08
	150	54	51	42	3	2.5	257	315	2700	3600	32314	—	37.0	84	86	138	125	140	4	12	2.5	2	0.35	1.73	0.95	4.11
150	54	51	42	3	2.5	297	391	2700	3600	32314C	5GD	44.4	84	84	138	115	142	5	12	2.5	2	0.55	1.10	0.60	4.50	
150	54	51	42	3	2.5	317	414	2700	3600	32314JR	2GD	37.4	84	86	138	125	140	4	12	2.5	2	0.35	1.74	0.96	4.50	
75	105	20	20	16	1	1	73.6	123	3300	4400	2BC	18.9	80.5	81	99.5	96	101	4	4	1	1	0.33	1.80	0.99	0.526	
	115	25	25	19	1.5	1.5	110	169	3100	4200	4CC	25.1	83.5	83	106.5	103	110	5	6	1.5	1.5	0.46	1.31	0.72	0.930	
	115	31	31	25.5	1.5	1.5	141	225	3200	4200	2CC	22.9	83.5	83	106.5	104	110	6	5.5	1.5	1.5	0.30	2.01	1.11	1.16	
	125	37	37	29	2	1.5	186	280	3000	4000	3DE	29.3	85	84	116.5	109	120	6	8	2	1.5	0.40	1.51	0.83	1.84	
	130	27.25	25	20	2	1.5	136	178	2900	3800	—	31.0	85	87	121.5	111	124	5	7	2	1.5	0.55	1.10	0.60	1.40	
	130	27.25	25	22	2	1.5	142	181	2900	3900	4DB	27.6	85	86	121.5	115	124	4	5	2	1.5	0.44	1.38	0.76	1.42	
	130	33.25	31	24	2	1.5	163	225	2900	3900	—	33.7	85	85	121.5	109	125	4	9	2	1.5	0.55	1.10	0.60	1.75	
	130	33.25	31	27	2	1.5	174	234	2900	3900	4DC	30.2	85	85	121.5	114	125	4	6	2	1.5	0.44	1.28	0.76	1.77	
	130	41	41	31	2	1.5	212	310	2900	3900	3EE	32.5	85	83	121.5	111	125	7	10	2	1.5	0.43	1.40	0.77	2.26	
	150	42	38	29	3	3	191	270	2200	3100	7FC	50.6	89	89	136	114	143	5	13	2.5	2.5	0.87	0.69	0.38	3.24	
160	40	37	26	3	2.5	213	254	2100	2900	7GB	49.9	89	89	148	127	151	6	14	2.5	2	0.83	0.73	0.40	3.45		
160	40	37	26	3	2.5	222	266	2100	2900	—	48.8	89	91	148	127	151	6	14	2.5	2	0.81	0.74	0.41	3.48		
160	40	37	31	3	2.5	248	296	2500	3400	—	39.2	89	94	148	130	150	6	9	2.5	2	0.55	1.10	0.60	3.80		
160	40	37	31	3	2.5	260	311	2500	3300	2GB	32.5	89	95	148	139	149	4	9	2.5	2	0.35	1.74	0.96	3.05		
160	40	37	31	3	2.5	251	298	2500	3300	—	31.9	89	95	148	139	149	4	9	2.5	2	0.35	1.73	0.95	3.32		

[Note] 1) Please consult with JTEKT when using the bearings identified by suffix C. They are medium-tapered types especially designed for special purposes.

KOYO T7FC075 – Rolamento utilizado nos redutores.

Double-row cylindrical roller bearings
d (110) ~ (260) mm



Boundary dimensions (mm)	Basic load ratings (kN)		Limiting speeds (min ⁻¹)		Bearing No.		Mounting dimensions (mm)					Roller Mass (kg)								
	d	D	C _r	C _{0r}	Grease lub.	Oil lub.	Cylindrical bore	Tapered bore	d _a min.	d _b min.	D _s max.	r _s max.	Cylindrical bore	Tapered bore						
110	170	45	2	155	221	361	3 500	4 200	NN3022	NN3022K	—	—	119	—	161	157	2	3.65	3.56	
120	165	45	1.1	134.5	187	373	3 400	4 000	—	—	—	—	126.5	132	137	158.5	—	1	2.90	2.77
	180	46	2	—	232	392	3 200	3 900	NN3024	NN3024K	—	—	129	—	171	167	2	4.00	3.87	
130	180	50	1.5	146	216	428	3 100	3 700	—	—	—	—	138	143.5	148	172	—	1.5	3.90	3.73
	200	52	2	—	283	476	2 900	3 500	NN3026	NN3026K	—	—	139	—	191	183	2	5.94	5.76	
140	190	50	1.5	156	222	456	2 900	3 500	—	—	—	—	148	153.5	158	182	—	1.5	4.15	3.97
	210	53	2	—	297	516	2 700	3 300	NN3028	NN3028K	—	—	149	—	201	194	2	6.41	6.21	
150	210	60	2	168.5	343	692	2 600	3 100	—	—	—	—	159	166	171	201	—	2	6.50	6.22
	225	56	2.1	—	334	587	2 500	3 000	NN3030	NN3030K	—	—	161	—	—	214	208	2	7.74	7.50
160	220	60	2	178.5	340	696	2 500	3 000	—	—	—	—	169	176	182	211	—	2	6.95	6.66
	240	60	2.1	—	398	695	2 400	2 800	NN3032	NN3032K	—	—	171	—	—	229	221	2	9.38	9.08
170	230	60	2	188.5	361	763	2 300	2 800	—	—	—	—	179	186	192	221	—	2	7.20	6.88
	260	67	2.1	—	471	824	2 200	2 600	NN3034	NN3034K	—	—	181	—	—	249	238	2	12.8	12.4
180	250	69	2	202	458	964	2 100	2 600	—	—	—	—	189	199.5	205	241	—	2	10.5	10.1
	280	74	2.1	—	561	958	2 000	2 400	NN3036	NN3036K	—	—	191	—	—	269	257	2	16.8	16.3
190	260	69	2	210	465	996	2 000	2 400	—	—	—	—	199	207	215	251	—	2	11.0	10.5
	290	75	2.1	—	598	1 020	1 900	2 300	NN3038	NN3038K	—	—	201	—	—	279	267	2	17.6	17.1
200	280	80	2.1	223	509	1 050	1 900	2 300	—	—	—	—	211	218.5	228	269	—	2	15.4	14.7
	310	82	2.1	—	638	1 120	1 700	2 100	NN3040	NN3040K	—	—	211	—	—	299	285	2	22.5	21.8
220	300	80	2.1	244	561	1 220	1 700	2 000	—	—	—	—	231	241	248	289	—	2	16.7	16.0
	340	90	3	—	752	1 370	1 600	1 900	NN3044	NN3044K	—	—	233	—	—	327	313	2.5	29.3	28.4
240	320	80	2.1	263	588	1 340	1 600	1 900	—	—	—	—	251	260	269	309	—	2	18.0	17.2
	360	92	3	—	864	1 590	1 400	1 700	NN3048	NN3048K	—	—	253	—	—	347	333	2.5	32.8	31.8
260	360	100	2.1	287	941	2 050	1 400	1 700	—	—	—	—	271	284	296	349	—	2	31.4	30.0

B 196

B 197

KOYO NN 3044 – Rolamento utilizado nos cilindros secadores.

1 Product information		2 Recommendations		3 Product data						
Page 3		Page 10		Single row angular contact ball bearings d 65 – 90 mm						
Principal dimensions	Basic load ratings	Fatigue load limit	Speed ratings	Mass	Designations*					
d	D	B	C	C ₀	C ₀					
mm	mm	mm	mm	mm	mm					
				kN	kN					
				r/min	r/min					
				kg	kg					
65	120	23	66.3	54	2.28	6 300	6 300	1.00	7213 BECBP	7213 BEP
	120	23	66.3	54	2.28	6 300	6 300	1.00	7213 BECBY	7213 BEY
	120	23	66.3	54	2.28	6 300	6 700	1.10	7213 BECBM	—
	140	33	116	86.5	3.65	6 300	6 300	2.10	7316 BECBP	—
	140	33	108	80	3.35	5 600	5 600	2.15	7316 BECBY	7316 BEP
	140	33	116	86.5	3.65	6 300	6 300	2.31	7316 BECBM	—
70	125	24	75	64	2.7	6 300	6 300	1.10	7214 BECBP	—
	125	24	71.5	60	2.5	6 000	6 000	1.10	7214 BECBY	7214 BEP
	125	24	72	60	2.55	6 300	6 300	1.18	7214 BECBM	—
	150	35	127	98	3.9	5 600	5 600	2.55	7314 BECBP	—
	150	35	119	90	3.65	5 300	5 300	2.67	7314 BECBY	7314 BEP
	150	35	127	98	3.9	5 600	5 600	2.83	7314 BECBM	—
75	130	25	72.8	64	2.65	5 600	5 600	1.18	7215 BECBP	7215 BEP
	130	25	70.2	60	2.5	5 600	6 000	1.29	7215 BECBM	—
	160	37	132	104	4.15	5 300	5 300	3.06	7316 BECBP	—
	160	37	125	98	3.8	5 000	5 000	3.06	7316 BECBY	7316 BEP
	160	37	133	106	4.15	5 000	5 000	3.20	7316 BECBM	—
	160	37	132	104	4.15	5 300	5 300	3.26	7316 BECBP	—
80	140	26	80.5	69.5	2.8	5 300	5 300	1.43	7216 BECBP	7216 BEP
	140	26	83.2	73.5	3	5 300	5 300	1.58	7216 BECBY	—
	140	26	85	75	3.05	5 600	5 600	1.59	7216 BECBM	—
	170	39	143	118	4.5	5 000	5 000	3.64	7316 BECBP	—
	170	39	135	110	4.15	4 500	4 500	3.64	7316 BECBY	7316 BEP
	170	39	143	118	4.5	4 500	4 500	3.70	7316 BECBM	—
	170	39	143	118	4.5	5 000	5 000	4.03	7316 BECBP	—
	170	39	135	110	4.15	4 500	4 800	3.80	7316 BECBY	7316 BEP
85	150	28	95.5	83	3.25	5 000	5 000	1.83	7217 BECBP	7217 BEP
	150	28	95.5	83	3.25	5 000	5 000	1.83	7217 BECBY	—
	150	28	95.5	83	3.25	5 000	5 300	1.99	7217 BECBM	—
	180	41	156	132	4.9	4 800	4 800	4.26	7317 BECBP	—
	180	41	146	112	4.5	4 300	4 300	4.26	7317 BECBY	7317 BEP
	180	41	153	132	4.9	4 300	4 300	4.59	7317 BECBM	—
	180	41	156	132	4.9	4 800	4 800	4.74	7317 BECBP	—
	180	41	146	112	4.5	4 300	4 500	4.74	7317 BECBY	7317 BEP

1 Product information		2 Recommendations		3 Product data										
Page 3		Page 10		Abutment and fillet dimensions										
Dimensions	d ₁	d ₂	D ₁	r _{1,2}	r _{3,4}	a	d _{a1}	d _{a2}	D _{s1}	D _{s2}	f _{a1}	f _{a2}	f _{b1}	f _{b2}
mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
65	86.4	75.5	100	1.5	1	50	74	111	114	1.5	1	1	1	1
	86.4	75.5	100	1.5	1	50	74	111	114	1.5	1	1	1	1
	86.4	75.5	100	1.5	1	50	74	111	114	1.5	1	1	1	1
	94.2	78.5	112.9	2.1	1.1	60	77	128	133	2	1	1	1	1
	94.2	78.5	112.9	2.1	1.1	60	77	128	133	2	1	1	1	1
	94.2	78.5	112.9	2.1	1.1	60	77	128	133	2	1	1	1	1
70	91.5	80.3	104.8	1.5	1	53	79	116	119	1.5	1	1	1	1
	91.5	80.3	104.8	1.5	1	53	79	116	119	1.5	1	1	1	1
	91.5	80.3	104.8	1.5	1	53	79	116	119	1.5	1	1	1	1
	101.1	84.4	121	2.1	1.1	64	82	138	143	2	1	1	1	1
	101.1	84.4	121	2.1	1.1	64	82	138	143	2	1	1	1	1
	101.1	84.4	121	2.1	1.1	64	82	138	143	2	1	1	1	1
75	96.3	85.3	110.1	1.5	1	56	84	121	124	1.5	1	1	1	1
	96.3	85.3	110.1	1.5	1	56	84	121	124	1.5	1	1	1	1
	96.3	85.3	110.1	1.5	1	56	84	121	124	1.5	1	1	1	1
	106.3	91.1												

Anexo II – Certificado de calibração do acelerômetro piezoelétrico.

~ Calibration Certificate ~

Per ISO 16063-21

Model Number: A0760GP
Serial Number: P166279
Description: ICP® Accelerometer **Method:** Back-to-Back Comparison (AT401-3)

Calibration Data

Sensitivity @ 6000 CPM 99 mV/g Output Bias 11.0 VDC
 (10.1 m²/m/s²)

Sensitivity Plot

Temperature: 69 °F (21 °C) Relative Humidity: 40 %

Data Points

Frequency (CPM)	Dev. (%)
600	1.8
REF. FREQ.	0.0
60000	-0.7

Mounting Surface: Stainless Steel Fastener: Stud Mount Fixture Orientation: Vertical
 Acceleration Level (rms): 1.00 g (9.81 m/s²)
¹The acceleration level may be limited by shaker displacement at low frequencies. If the listed level cannot be obtained, the calibration system uses the following formula to set the vibration amplitude: Acceleration Level (g) = 0.017 x (freq)².
²The gravitational constant used for calculations by the calibration system is: 1 g = 9.80665 m/s².

Condition of Unit

As Found: n/a
As Left: New Unit, In Tolerance

Notes

1. Calibration is NIST Traceable thru Project 822/277342 and PTB Traceable thru Project 1254.
2. This certificate shall not be reproduced, except in full, without written approval from the manufacturer.
3. Calibration is performed in compliance with ISO 9001, ISO 10012-1, ANSI/NCSL Z540-1-1994 and ISO 17025.
4. See Manufacturer's Specification Sheet for a detailed listing of performance specifications.
5. Measurement uncertainty (95% confidence level with coverage factor of 2) for frequency ranges tested during calibration are as follows: 5-9 Hz; +/- 2.0%, 10-99 Hz; +/- 1.5%, 100-1999 Hz; +/- 1.0%, 2-10 kHz; +/- 2.5%.

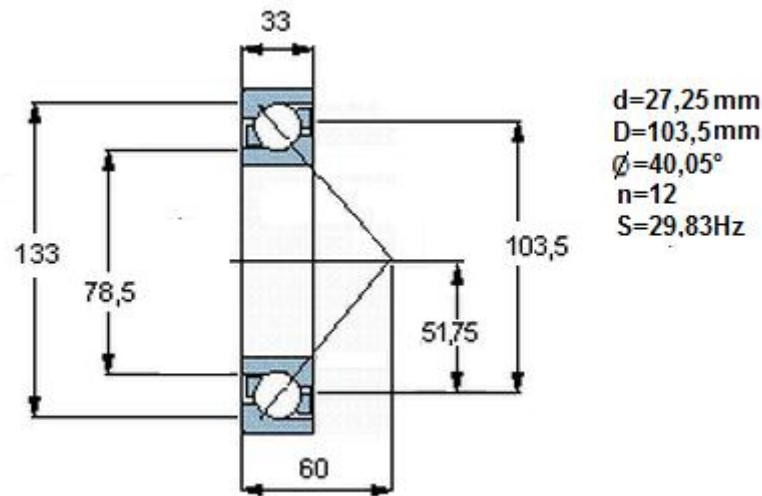
Technician: Elton Lewis **Date:** 03/05/10

835 Innovation Drive
 Knoxville, TN 37932
 Phone: 865-675-2110
 Fax: 865-218-1401

PAGE 1 of 1 cal7 - 3359638875.33



Apêndice I – Cálculo analítico das frequências de defeito do rolamento SKF 7313.



SKF 7313 – Dados utilizados para o cálculo analítico.

$$\text{arc tan } \phi = \frac{60\text{ mm} - \frac{33\text{ mm}}{2}}{51,75\text{ mm}}$$

$$\phi = 40,05^\circ$$

$$FTF = \frac{S}{2} \cdot \left(1 \pm \frac{d}{D} \cdot \cos \phi\right)$$

$$FTF = \frac{29,83\text{ Hz}}{2} \left(1 - \frac{27,25\text{ mm}}{103,5\text{ mm}} \cos 40,05^\circ\right)$$

$$FTF = 11,909\text{ Hz}$$

$$FTF = \frac{11,909\text{ Hz}}{29,83\text{ Hz}} = 0,399 \text{ ordens}$$

$$BSF = \frac{S}{2} \cdot \frac{D}{d} \cdot \left[1 - \left(\frac{d}{D} \cdot \cos \phi\right)^2\right]$$

$$BSF = \frac{29,83\text{ Hz} \cdot 103,5\text{ mm}}{2 \cdot 27,25\text{ mm}} \left[1 - \left(\frac{27,25\text{ mm}}{103,5\text{ mm}} \cos 40,05^\circ\right)^2\right]$$

$$BSF = 54,348\text{ Hz}$$

$$BSF = \frac{54,348\text{ Hz}}{29,83\text{ Hz}} = 1,822 \text{ ordens}$$

$$BPFI = \frac{S \cdot n}{2} \cdot \left(1 + \frac{d}{D} \cdot \cos \phi\right)$$

$$BPFI = \frac{29,83\text{ Hz} \cdot 12}{2} \left(1 + \frac{27,25\text{ mm}}{103,5\text{ mm}} \cos 40,05^\circ\right)$$

$$BPFI = 215,052\text{ Hz}$$

$$BPFI = \frac{215,052\text{ Hz}}{29,83\text{ Hz}} = 7,209 \text{ ordens}$$

$$BPFO = \frac{S \cdot n}{2} \cdot \left(1 - \frac{d}{D} \cdot \cos \phi\right)$$

$$BPFO = \frac{29,83\text{ Hz} \cdot 12}{2} \left(1 - \frac{27,25\text{ mm}}{103,5\text{ mm}} \cos 40,05^\circ\right)$$

$$BPFO = 142,908\text{ Hz}$$

$$BPFO = \frac{142,908\text{ Hz}}{29,83\text{ Hz}} = 4,790 \text{ ordens}$$