



Projeto de Graduação

Análise de Falhas em Mancais de Rolamento
Utilizando a Técnica do Envelope

Rodrigo Jorge de Castilho Barilli

DRE: 107349723

PROJETO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA NAVAL E OCEÂNICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRA NAVAL E OCEÂNICA.

Orientador: Ulisses Admar Barbosa Vicente Monteiro, D.Sc.

Rio de Janeiro

Abril, 2013

Universidade Federal do Rio de Janeiro

Análise de Falhas em Mancais de Rolamento Utilizando a Técnica do Envelope

Rodrigo Jorge de Castilho Barilli

DRE: 107349723

Habilitação:
Engenharia Naval e Oceânica

Banca Examinadora:
Ulisses A. Monteiro, D.Sc., (Orientador)

Luis Antônio Vaz Pinto, D. Sc.

Antonio Carlos Ramos Troyman, D.Sc.

Rio de Janeiro

Abril, 2013

Análise de Falhas em Mancais de Rolamento Utilizando a Técnica do Envelope

Rodrigo Jorge de Castilho Barilli

DRE: 107349723

PROJETO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA NAVAL E OCEÂNICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRA NAVAL E OCEÂNICA.

Aprovado por:

Ulisses A. V. Monteiro, D.Sc.

(ORIENTADOR)

Luis Antônio Vaz Pinto, D.Sc.

Antonio Carlos Ramos Troyman, D.Sc.

Rio de Janeiro

Abril, 2013

Dedicatória

Dedico este trabalho a meus pais, Jorge
Barilli e Elomar Barilli, pessoas
queridas e presentes cujo apoio fora
indispensável para que eu chegasse
neste ponto.

Agradecimentos

Agradeço ao meu orientador, Ulisses Monteiro, pelo apoio e disponibilidade durante a pesquisa, e aos demais Professores, pelos conhecimentos transmitidos. Agradeço também a minha companheira Tainá Meinicke pelo amor, carinho, dedicação e compreensão dispensados no decorrer de minha formação.

Resumo

Os defeitos percebidos em mancais de rolamento constituem um fator de grande influência na ocorrência de falhas em máquinas rotativas. A interrupção do uso decorrente de sua manutenção corretiva de tais falhas⁵, pode demandar significativos períodos de tempo ocasionando prejuízos financeiros em diversos segmentos da economia. O enfrentamento desta consequência aponta para a necessidade de elaboração de técnicas que viabilizem a detecção precoce de defeitos, com vistas a impedir a intensificação dos danos causados às máquinas, além de diminuir as interrupções em sua utilização. Assim, a detecção precoce de falhas pode implicar em um planejamento adequado das intervenções de manutenção, da racionalização do consumo de materiais sobressalentes, a otimização dos recursos humanos e financeiros, além de reduzir eventuais impactos ambientais.

Nesse contexto, o conceito de manutenção preditiva vem ganhando destaque. Consiste na manutenção programada a partir do diagnóstico das condições do equipamento, evitando interrupções inesperadas e auxiliando na tomada de decisão. Essa prática demanda o desenvolvimento de sistemas especialistas capazes de interpretar dados automaticamente e prover o diagnóstico de falhas em mancais de rolamento, já que essas representam uma parcela significativa na ocorrência de defeitos em máquinas rotativas presentes na indústria naval. Para isso, faz-se necessária a utilização de técnicas de reconhecimento de padrões e redes neurais a fim de viabilizar a elaboração desses sistemas, tornando-os aptos a desempenhar diagnósticos mais precisos e melhorar a eficiência dos prognósticos.

Na maior parte dos casos, os sinais de falhas oriundos de mancais de rolamento são caracterizados por altas frequências e pequenas amplitudes. Além disso, os sinais apresentam frequências associadas a diversos tipos de ruidos, tais como as ressonâncias introduzidas pelos próprios detectores de aquisição ou ruidos oriundos de pontos situados no caminho de transmissão entre a estrutura da máquina rotativa e os detectores dos sinais, por exemplo.

Logo, para garantir a confiabilidade dos resultados provenientes dos sistemas especialistas, é necessária a utilização de um pré-processamento de dados a fim de permitir a extração das informações associadas às falhas sob diversas condições de operação.

O presente trabalho tem por meta apresentar os resultados experimentais obtidos a partir de testes realizados em mancais de rolamento defeituosos em um rotor simulando uma

máquina. O experimento consiste na identificação de defeitos em quatro mancais pelo espectro de vibração através de um *software* de processamento de sinais desenvolvido em LabVIEW® utilizando as técnicas FFT e Envelope. Em complemento, os principais tipos de mancais existentes são apresentados, bem como as principais técnicas de análise de vibração utilizadas para diagnóstico de falha nesses componentes. Também é apresentado um resumo bibliográfico mostrando as vantagens e desvantagens do uso de cada técnica.

Sumário

| | | |
|------|--|----|
| 1. | Introdução | 1 |
| 2. | Mancais de Rolamento e Mecanismos de Falha | 3 |
| 3. | Vibração em Mancais de Rolamento | 8 |
| 3.1. | Frequências Características de Falha | 9 |
| 3.2. | Modulação de Amplitude em Mancais | 11 |
| 3.3. | Técnicas no Domínio do Tempo | 14 |
| 3.4. | Técnicas no Domínio da Frequência..... | 17 |
| 3.5. | Técnicas no Domínio Tempo-Frequência..... | 21 |
| 4. | Resumo Bibliográfico | 23 |
| 5. | Desenvolvimento do <i>Software</i> de Análise do Sinal de Vibração | 26 |
| 6. | Estudo de Caso..... | 27 |
| 6.1. | Análise dos resultados: | 38 |
| a) | Mancal 1: | 39 |
| b) | Mancal 2: | 40 |
| c) | Mancal 3 : | 45 |
| d) | Mancal 4: | 50 |
| 7. | Conclusão e Recomendação | 58 |
| 8. | Referências Bibliográficas | 60 |

1. Introdução

Com uma economia cada vez mais globalizada, a disputa por mercados vem exercendo uma influência significativa no processo de gerenciamento de ativos na indústria mundial. A necessidade de ampliar os mercados caracteriza uma forte pressão para aumento da produtividade, o que gera um aumento da expectativa dos usuários em relação ao desempenho dos equipamentos envolvidos nos processos produtivos. A consequência trazida por este cenário é a criação de condições de operação cada vez mais severas, nas quais os equipamentos são submetidos a altas taxas de utilização em faixas de potência próximas ao limite de projeto. O bom desempenho dos equipamentos frente a tais condições de operação está fortemente atrelado à redução do impacto de eventuais falhas, tanto para mitigar possíveis danos aos usuários, financeiros ou relativos à própria segurança na utilização, quanto reduzir riscos de impacto ao meio ambiente.

Nesse contexto, a manutenção preditiva ganha destaque, já que possibilita ao usuário identificar a ocorrência de falhas em fases incipientes, o que contribui diretamente para a garantia de um bom desempenho. Essa técnica consiste no monitoramento de variáveis operacionais do equipamento, seguido de uma análise dos eventuais desvios, a fim de viabilizar a detecção de indícios sintomáticos de defeitos antes da ocorrência de uma falha. Dessa forma, a possibilidade de antecipar as falhas permite um planejamento adequado das intervenções de manutenção, a racionalização do consumo de materiais sobressalentes, a otimização dos recursos humanos e financeiros, além de reduzir eventuais impactos ambientais.

A identificação dos componentes críticos de um equipamento é imprescindível para um gerenciamento adequado dessa técnica. Um defeito em tal componente pode levar a falhas catastróficas no equipamento, podendo acarretar na suspensão não programada da operação, o que pode trazer consequências negativas, especialmente se esse tiver particular importância no processo produtivo. Em máquinas rotativas, um componente que pode receber essa classificação é o mancal de rolamento.

Sistemas especialistas podem ser definidos como programas de monitoramento dos parâmetros de operação a fim de identificar possíveis indícios de falhas nos componentes da máquina. A técnica mais difundida para previsão de falhas em mancais de rolamento é o 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. Essa análise demanda a utilização de uma combinação de técnicas de processamento de sinais com vistas a obtenção de informações que possibilitem o diagnóstico das condições do mancal, sob as mais diversas condições de operação. Dentre as técnicas existentes, destaca-se a análise do envelope, já que há registros de sucesso em sua utilização por alguns pesquisadores.

No capítulo 2, são apresentados os principais tipos de mancais de rolamento e suas aplicações na indústria. Além disso, é apresentada uma discussão no que tange aos tipos de defeitos, principais causas de falhas e manutenção em mancais de rolamento.

O capítulo 3 aborda as vibrações em mancais de rolamento. É apresentada uma discussão sobre as alterações nas características da vibração dos mancais bem como sobre as frequências características de falha que, como mencionadas anteriormente, permitem a identificação de defeitos em mancais. Serão apresentadas as causas que conduzem ao pequeno desvio entre os valores calculados para as frequências de falha e os obtidos na prática. Adicionalmente, o ítem aborda os efeitos da modulação de amplitude na vibração e apresenta as principais técnicas de processamento de sinais disponíveis, demonstrando suas peculiaridades.

No capítulo 4 é feita uma síntese dos artigos pesquisados, explicitando as técnicas utilizadas, os resultados obtidos e as principais conclusões.

O capítulo 5 apresenta as principais características do software de processamento de sinais desenvolvido para este trabalho, sua interface e funcionalidades.

O capítulo 6 descreve o experimento realizado e analisa os resultados obtidos.

No capítulo 7 são apresentadas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

2. Mancais de Rolamento e Mecanismos de Falha

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 a estrutura da máquina rotativa. Segundo N.TANDON e A. CHOUDHURY [2,3], 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.

A Figura 1 mostra um esquema de um mancal de rolamento suportando um eixo rotativo.

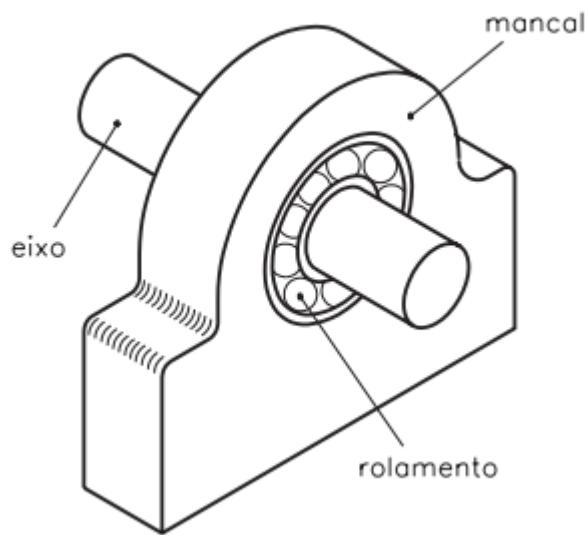


Figura 1 – Componentes de Um Mancal de Rolamento. (Fonte: *Google Images*)

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.

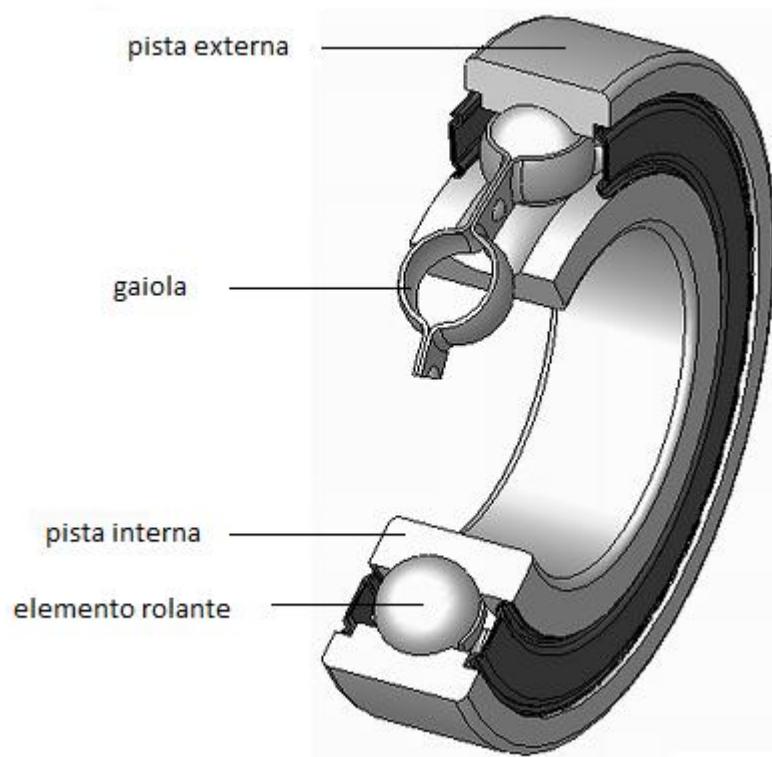


Figura 2 – Componentes de um Rolamento. (Fonte: *Google Images*)

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.

A Figura 3 apresenta os principais tipos de mancais de rolamento existentes classificados em função dos seus elementos rolantes.



Figura 3 – Tipos de mancais de rolamento classificados em função dos seus elementos rolantes: (A) Esferas, (B) Cilindros, (C) Agulhas, (D) Troncos de Cone. (Fonte: *Google Images*)

Mancais de Esferas (Figura 2 – A) possuem pequena área de contato entre as pistas interna e externa, o que faz com que a rotação seja suave. Porém, isso limita sua capacidade de suportar grandes esforços. São modelos tipicamente baratos, empregados em discos rígidos, polias, caixas de transmissão e eixos de motores.

Mancais de cilindros (Figura 2 – B) suportam maiores cargas que os rolamentos de esferas, mas perdem a capacidade de suportar cargas se os trilhos estiverem desalinhados. São empregados em transmissões, máquinas de vibração e em rodas de veículos ferroviários.

Mancais de agulhas (Figura 2 – C) são os mais compactos dos modelos de mancais de rolamento disponíveis. Possuem grande área de contato com a superfície dos trilhos, mas

tendem a sofrer fadiga precoce. São tipicamente empregados em bombas, compressores e transmissões.

Mancais de troncos de cone (Figura 2 – D) suportam grandes cargas radiais e axiais. São comumente utilizados com velocidades moderadas, em aplicações que requerem alta durabilidade. São empregados em sistemas de eixos, caixas de transmissão e rodas de automóveis.

Embora os mancais de rolamento tendam a gastar-se com o tempo, em alguns casos é possível fazê-los durar mais que os outros componentes da máquina, desde que tomados os devidos cuidados. Resfriamento, limpeza, lubrificação adequada e utilização apenas nos limites de carregamento de projeto são medidas que ajudam a retardar a formação de defeitos nos componentes do mancal.

Segundo N.TANDON e A. CHOUDHURY[2,3], a presença de um defeito altera significativamente os níveis de vibração em um mancal. Logo, é necessário ter conhecimento dos tipos de defeitos e como esses são classificados. Defeitos em mancais podem ser divididos em locais ou distribuídos. Defeitos distribuídos podem ser exemplificados por rugosidades superficiais, ondulações, desalinhamento entre as pistas rolantes e elementos rolantes de tamanhos diferentes, montados de forma incorreta. Esses são causados por erros nos processos de fabricação, instalação inapropriada ou desgaste das partes

De acordo com os autores supracitados, defeitos localizados são exemplificados por trincas, corrosões, lascas ou estilhaços nas superfícies em rotação. O modo de falha predominante em mancais de rolamentos é a fragmentação das pistas, causada a partir da geração de uma trinca por fadiga sob a superfície, a qual se propaga até a superfície do material, até que um pedaço deste se quebra, liberando uma lasca. A trinca por fadiga pode ser causada por um excesso de carga sobre o rolamento ou pela colisão devido ao carregamento durante a operação ou instalação. Outro tipo de falha é a erosão elétrica, causada pela abertura de arco no interior do rolamento durante sua operação. Além desses, podem-se destacar algumas causas comuns para ocorrência de falhas: seleção incorreta, defeito de fabricação, montagem incorreta e lubrificação inadequada.

Sempre que um defeito local em um elemento interage com outro elemento em contato, mudanças abruptas no contato dessa interface resultam na geração de pulsos de duração muito curta. Tais pulsos produzem vibrações e ruidos que podem ser monitorados a fim de detectar-se a presença de defeitos no rolamento. Os defeitos costumam evoluir de

forma lenta, de modo que os mancais emitem sinais com bastante antecedência à falha final. As Figuras 4A e 4B exemplificam dois tipos de falhas localizadas.

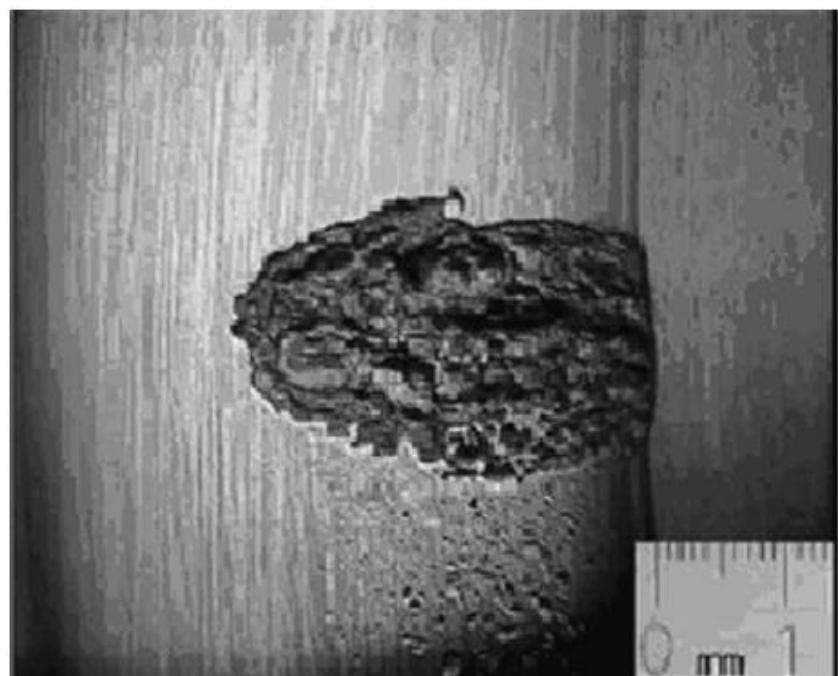
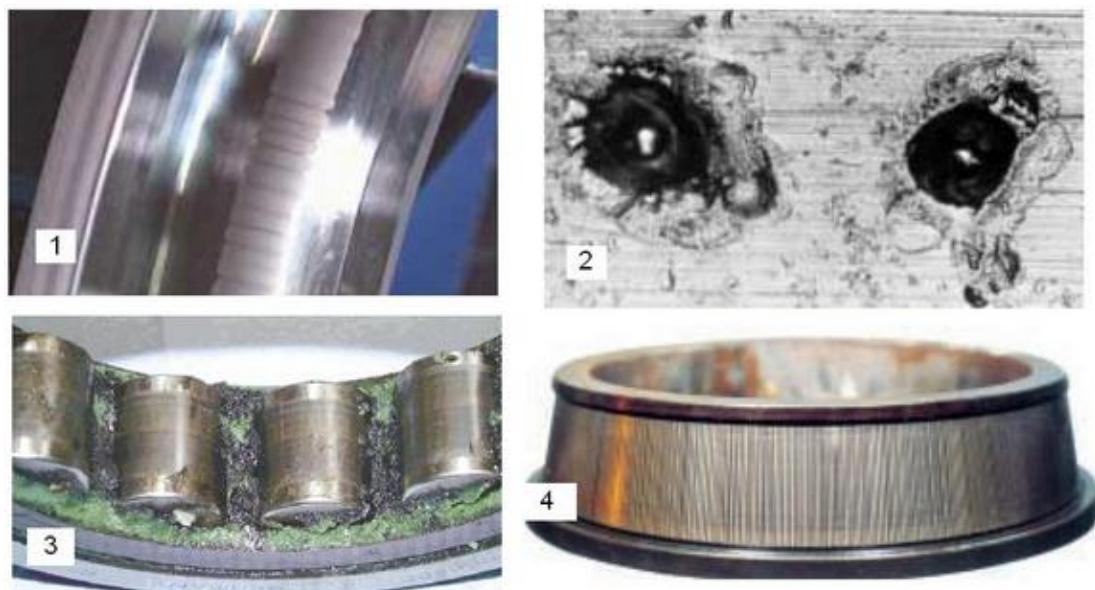


Figura 4 A – Falha localizada na pista interna de um mancal de esferas (SAWALHI *et al.*, 2007).



- 1 - Pista interna de rolamento com marcas característica de erosão elétrica.
- 2 - Derretimento e perda do material pela passagem de corrente elétrica (abertura de arco elétrico)
- 3 - Lubrificante com aspecto escuro decorrente de descarga elétrica (passagem de corrente)
- 4 - Pista interna de rolamento de rolos cônicos com marcas transversais de erosão elétrica.

Figura 4 B – Falha na pista interna de um mancal de cilindros devido à erosão elétrica (SAWALHI *et al.*, 2007).

3. Vibração em Mancais de Rolamento

De acordo com RIPPER [7], pode-se aplicar a manutenção preditiva por meio do monitoramento de parâmetros característicos do estado em que a máquina se encontra, como temperatura, descargas parciais e, no caso de equipamentos elétricos, análise cromatográfica de óleo isolante. Dentre estes, destaca-se o monitoramento dos níveis de vibração, o qual permite a obtenção de uma maior riqueza de informações acerca das condições do equipamento, tornando-o o método mais utilizado.

Vários estudos vêm sendo desenvolvidos com intuito de explicar os mecanismos de geração de ruídos e vibrações em mancais de rolamentos. Elementos de rolamentos carregados radialmente geram vibrações mesmo quando forem geometricamente perfeitos. Isso se deve a utilização de um número finito de elementos rolantes para suportar o carregamento.

O número de elementos rolantes e suas posições na zona de carregamento, situada na porção do rolamento abaixo da carga sendo suportada (mostrada na Figura 5), varia de acordo com a rotação do rolamento, dando origem a variações periódicas na rigidez total do mesmo. Supondo-se que as pistas do rolamento sejam sistemas contínuos, a mudança de direção das forças de contato aplicadas pelos elementos rolantes pode causar vibração por flexão das pistas, mesmo se essas forem geometricamente perfeitas, o que constitui um mecanismo de geração de falha.

A Figura 5 ilustra o caso de um mancal sujeito a carregamento unidirecional vertical.

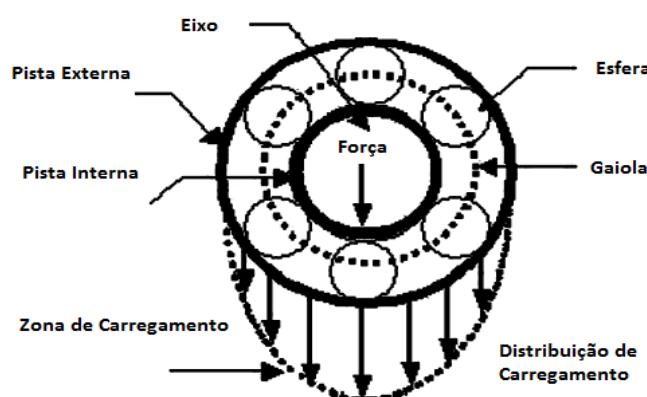


Figura 5- Componentes de um mancal de rolamento e zona de carregamento. (SAWALHI *et al.*, 2007)

Entretanto, conforme mencionado anteriormente, a presença de um defeito causa um aumento significativo nos níveis de vibração em virtude dos pulsos de curta duração gerados pela interação entre uma falha local e o elemento adjacente. Quando um elemento rolante colide com uma falha localizada, ocorre uma excitação de ressonâncias na estrutura em frequências específicas. Essa constatação abre margem para elaboração de um método eficiente de diagnóstico, no qual é realizado um isolamento de frequências visando permitir a identificação de ressonâncias associadas a falhas.

Diferentes técnicas de análise de sinal são utilizadas na detecção e diagnóstico de falhas em mancais de rolamento por análise da vibração. Essas técnicas não são totalmente independentes entre si. Em muitos casos essas são complementares umas das outras. Dentre as formas de classificação, as mais comuns são quanto ao domínio onde são aplicadas (tempo, frequência, tempo-frequência).

Duas abordagens foram adotadas por pesquisadores para a criação de estudos de resposta de vibração em mancais de rolamento. A primeira consiste em submeter o rolamento à operação contínua até a falha do mesmo, monitorando-se continuamente as mudanças nas respostas de vibração. Geralmente essa abordagem é acelerada criando-se uma condição de operação extrema a partir da introdução de um excesso de velocidade de rotação ou propositalmente eliminando-se a lubrificação do rolamento. A segunda abordagem consiste na introdução intencional de um defeito no rolamento através de técnicas como aplicação de ácido, erosão de lascas, arranhões ou identação mecânica. Em seguida, são medidas as respostas de vibração, as quais são comparadas com rolamentos íntegros. Vale ressaltar que a segunda abordagem permite a extração de resultados mais rapidamente, porém demanda técnicas especiais para preparação dos defeitos que devem ser cuidadosamente planejadas. A escolha por uma dessas abordagens será discutida em seções posteriores.

3.1. Frequências Características de Falha

Cada elemento do mancal possui uma frequência rotacional característica de falha. Segundo N.TANDON e A. CHOUDHURY[2,3], um defeito em um elemento particular do rolamento pode provocar um aumento da energia vibracional na frequência rotacional desse elemento. A Figura 6 mostra sinais de aceleração típicos de falhas em vários componentes de um mancal de rolamento e os sinais de envelope correspondentes produzidos por demodulação da amplitude. As equações (1) a (4) fornecem as expressões para a estimativa das frequências características de falha de um mancal de rolamento (considerando a pista externa estacionária), conforme apresentado por N.TANDON e A. CHOUDHURY[2,3]:

- BPFI – Frequência de passagem dos elementos rolantes por um ponto da pista interna (*Ball Pass Frequency Inner*),

$$\omega_{id} = \frac{Z\omega_s}{2} \left(1 + \frac{d}{D} \cos\alpha\right) \quad (1)$$

- BPFO – Frequência de passagem dos elementos rolantes por um ponto da pista externa (*Ball Pass Frequency Outer*),

$$\omega_{od} = \frac{Z\omega_s}{2d} \left(1 - \frac{d}{D} \cos\alpha\right) \quad (2)$$

- BSF – Frequência de rotação dos elementos rolantes (*Ball Spin Frequency*),

$$\omega_b = \frac{D\omega_s}{2d} \left(1 - \frac{d^2}{D^2} \cos^2\alpha\right) \quad (3)$$

- FTF – Frequência de rotação da gaiola (*Fundamental Train Frequency*),

$$\omega_s = \frac{\omega_s}{2} \left(1 - \frac{d}{D} \cos\alpha\right) \quad (4)$$

Onde ω_s é a velocidade de rotação do eixo, em rad/s; d é o diâmetro do elemento rolante; D é o diâmetro da gaiola; Z é o número de elementos rolantes; α é o ângulo de contato.

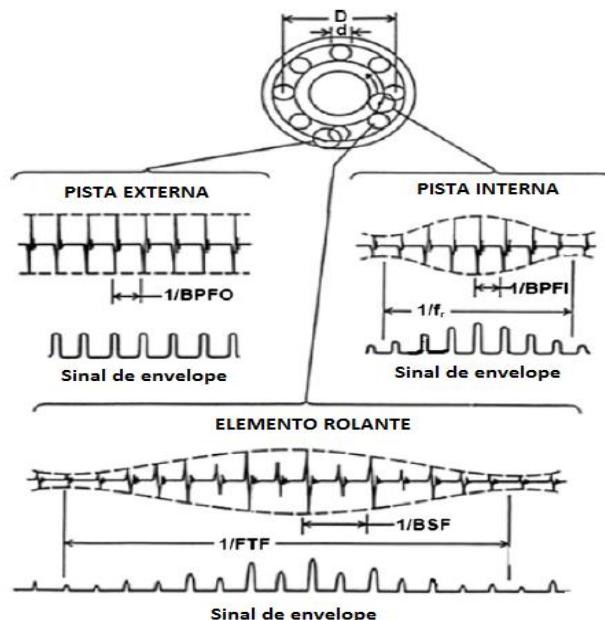


Figura 6 – Sinais típicos de falhas localizadas em mancais de rolamento (RANDALL e ANTONI, 2011).

Segundo N.TANDON e A. CHOUDHURY[2,3], na prática essas frequências podem variar ligeiramente do valor medido em função do deslizamento do elemento rolante provocado por efeitos como a variação de carga imposta ao mancal. Essa variação é

tipicamente da ordem de 1 a 2% e, mesmo pequena, provoca uma alteração significativa na característica do sinal. Por esse motivo, a análise de envelope extrai informações diagnósticas frequentemente não disponíveis no sinal puro.

Segundo P.D. MC FADDEN e J.D. SMITH [6], o espectro pode ser influenciado pela presença de vibrações oriundas de componentes espúrios, os quais não são relacionados ao defeito. Mudanças no carregamento sobre os elementos rolantes, desbalanceamentos ou desalinhamentos podem gerar modulações na frequência de rotação do eixo, podendo mascarar as frequências relacionadas a defeitos. Outro componente espúrio a ser considerado é a amplificação das amplitudes devido a ressonância do próprio acelerômetro empregado na detecção dos sinais. Dessa forma, torna-se difícil obter picos significativos nas frequências características de falhas a partir da análise do espectro gerado pela FFT isoladamente. Para tornar a análise espectral mais efetiva, foram desenvolvidas outras técnicas a serem empregadas complementarmente, que serão apresentadas mais adiante.

3.2. Modulação de Amplitude em Mancais

Segundo L. PONCI e P. CUNHA [8], modulação de amplitude é a variação com o tempo da amplitude de uma vibração (Figura 6). Nesse caso, a componente básica é denominada Portadora e o sinal que descreve a variação da amplitude da portadora ao longo do tempo é denominado Sinal Modulante ou Componente Moduladora e a sua frequência é denominada Frequência de Modulação conforme apresentado nas Figuras 7 e 8.

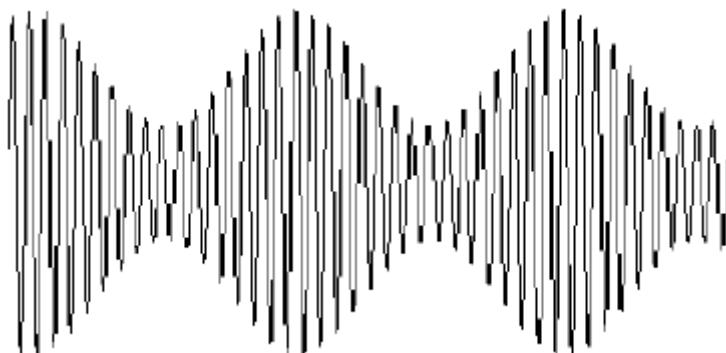


Figura 7 – Modulação de Amplitude. (PONCI e CUNHA, 2004)

O espectro de um sinal modulado (Figura 7) consta de um pico central na frequência portadora (f_p), ladeado por picos denominados Bandas Laterais, que se situam acima e abaixo

da portadora e são espaçados entre si e do pico central por um valor igual à Frequência de Modulação (fm). Em sinais senoidais será esperada uma banda lateral de cada lado do pico, enquanto que em sinais mais complexos são esperadas mais bandas laterais - Figura 8.

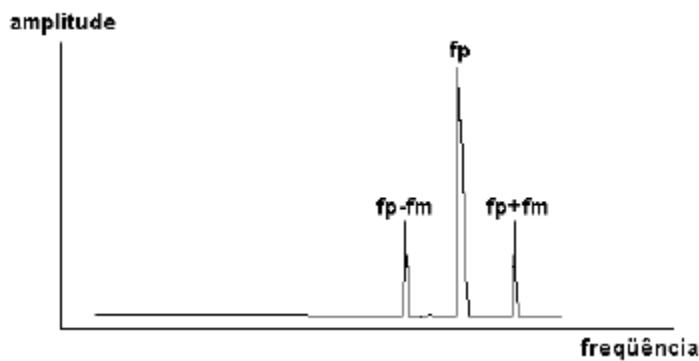


Figura 8 – Espectro de um Sinal Modulado. (PONCI e CUNHA, 2004)

Os defeitos em rolamentos geram impactos repetitivos que excitam vibrações livres de curta duração (com alto amortecimento) em frequências naturais elevadas, acima de 500 Hz, as quais se propagam pela caixa dos mancais e estrutura da máquina na forma de ondas de tensão. Assim, essas vibrações livres geradas pelos defeitos em rolamentos são moduladas em amplitudes pela sequência de impactos repetitivos e pelo efeito do amortecimento. As portadoras são as frequências naturais dos componentes do rolamento (pistas e elementos rolantes), da caixa e da estrutura do equipamento. As modulantes são as frequências básicas de falha (BSF, BPFO e BPFI).

Com isso, pode-se observar que na ocorrência de um defeito nas pistas girantes, geralmente a interna, a intensidade da vibração aumenta quando a região contendo o defeito passa pela zona de carregamento, provocando uma modulação de amplitude da componente BPFI (ou BPFO) pela frequência de rotação da pista. Quando o defeito localiza-se somente em alguns elementos rolantes, a intensidade da vibração aumenta quando os elementos defeituosos passam pela zona de carregamento, provocando uma modulação em amplitude da componente BSF e da frequência de rotação da gaiola FTF. Além disso, quando o defeito se propaga e se espalha pelas pistas e elementos rolantes, os efeitos de modulação e a intensidade das bandas laterais correspondentes são reduzidos.

Segundo REIS et al. [18], a ocorrência de um defeito na pista externa, na prática, tendem a gerar sinais de vibração com amplitudes e direções com níveis constates. Isso se deve ao fato da posição do defeito manter-se constante em relação ao acelerômetro utilizado

para a detecção dos dados. Em contra partida, defeitos localizados na pista interna ou elementos rolantes apresentam uma tendência de geração de sinais de vibração mais complexos, quando comparados com os sinais referentes à pista externa. A passagem dos elementos defeituosos em rotação pela zona de carregamento causa uma mudança contínua da intensidade da carga e do caminho de transmissão dos impactos em relação a posição do sensor. As Figuras 6 e 8 exemplificam em forma de gráficos essa variação entre os sinais obtidos para as falhas comentadas.

A Figura 9 (b) ilustra a situação de uma falha na pista interna, onde os impulsos são gerados na taxa da BPFI (*Ball Pass Frequency Inner*) e são modulados pela frequência do eixo.

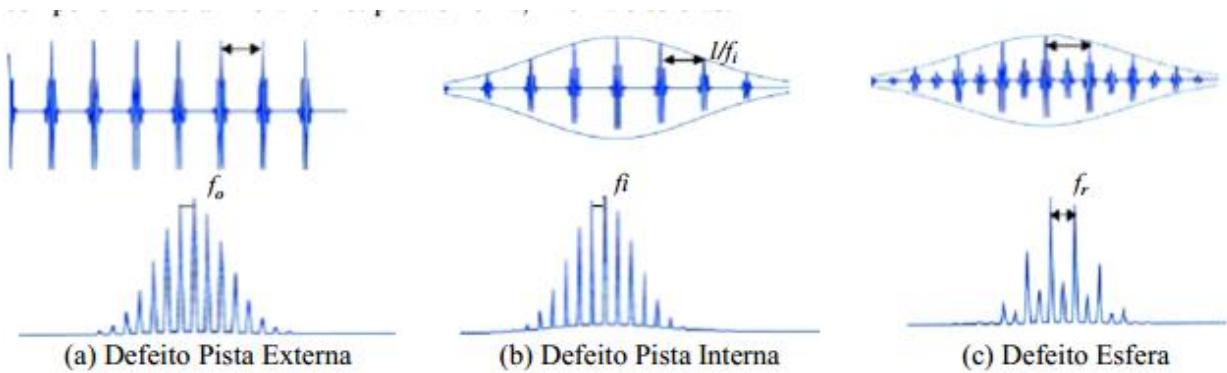


Figura 9 – Forma de onda e respectivo espectro de rolamento com falha (SHEEN et al.)

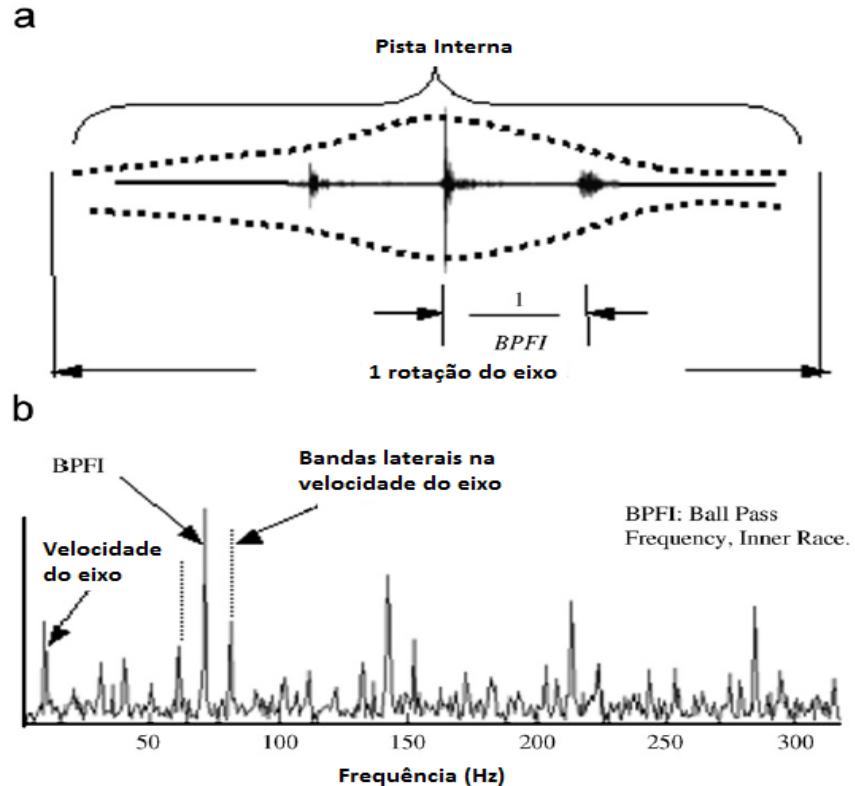


Figura 10 – Falha na pista interna: (a) assinatura no domínio do tempo, (b) espectro do envelope. (SAWALHI, RANDALL e ENDO, 2007)

Quando o defeito tem sua origem na pista interna, na gaiola ou nos elementos rolantes, devido ao caminho de propagação mais longo e desfavorável, os níveis de vibração são captados de forma reduzida em comparação com os níveis detectados quando defeitos de mesma severidade ocorrem na pista externa. Por isso, defeitos da pista externa são sempre detectados com mais antecedência.

3.3. Técnicas no Domínio do Tempo

Os métodos de monitoramento do estado do rolamento podem ser classificados, segundo as análises de vibrações, em três classes no que tange ao domínio no qual o sinal é tratado: domínio do tempo, frequência e, mais recentemente, métodos que utilizam combinações de domínios tempo-frequência.

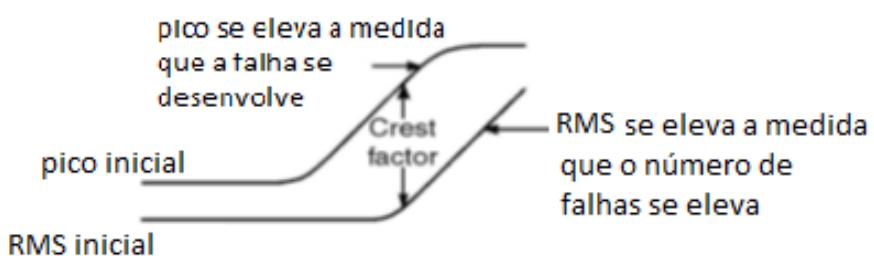
Segundo N.TANDON e A. CHOUDHURY[2,3], a medição dos níveis globais RMS (*Root Mean Square*) e a medição regular dos fatores de crista constituem a abordagem mais simples, no domínio do tempo, para avaliação de sinais de vibração. Os níveis RMS são medidos e comparados com valores préviamente analisados e catalogados a fim de permitir uma indicação da severidade da vibração. Para um sinal $x(t)$, o valor RMS é o seguinte:

$$X_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T_2 - T_1} \int_{T_1}^{T_2} [x(t)]^2 dt} \quad (5)$$

Segundo os autores supracitados, há registros de utilização deste método para detecção de defeitos localizados, os quais demonstram sucesso limitado. Entretanto, percebe-se que geralmente as vibrações globais em um rolamento aumentam apenas em estágios finais de falha, fornecendo diagnósticos tardios. Além disso, essa técnica revela apenas indicações de ocorrência de aumento na energia do sinal, o qual pode ser causado por um desenvolvimento da falha. No entanto, a técnica não disponibiliza informações sobre a localização dos defeitos.

O Fator de Crista consiste na razão entre o nível de pico da vibração e o nível do valor RMS, medidos em uma banda de frequência. No momento em que o rolamento sofre um dano, ocorre uma elevação mais acentuada no nível de aceleração em comparação ao nível RMS. Dessa forma, calculando-se a razão dessa diferença de níveis e comparando-a com valores previamente estabelecidos para patamares de ocorrência de defeitos, é possível realizar uma avaliação das condições do rolamento. Em condições de vibração normal, livre de defeitos, o fator de crista permanece em baixos patamares, com valores variando de 2 a 6. No entanto, o surgimento e evolução de falhas promove um aumento nos mesmos, atingindo valores superiores a 6. No entanto, à medida que as falhas se propagam pela superfície do rolamento, os picos discretos desaparecem e o nível RMS se eleva, reduzindo o valor do fator de crista. Essa redução pode ser utilizada como um indício sintomático da ocorrência de falhas distribuídas, o que pode revelar a necessidade de reparos no rolamento. A Figura abaixo ilustra a obtenção do fator de crista.

$$\text{fator de crista} = \frac{\text{pico}}{\text{RMS}} \quad (6)$$



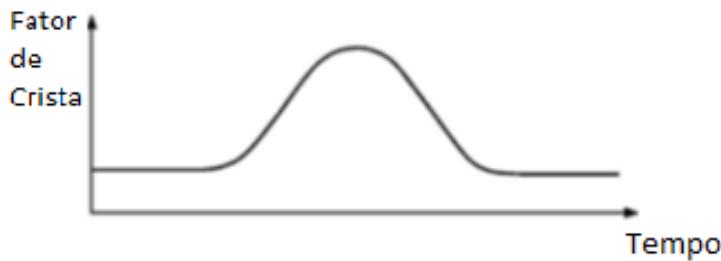


Figura 11 – Obtenção do Fator de Crista

Outra abordagem é a análise da densidade de probabilidade das acelerações nos rolamentos. Sabe-se que para um rolamento em boas condições, tal densidade é caracterizada por uma distribuição gaussiana, enquanto que para um rolamento com falhas, tem-se uma distribuição não gaussiana. Entretanto, MATHEWE e ALFREDSON [15] reportaram em seus estudos a obtenção de distribuições quase gaussianas para mancais defeituosos. Isso gerou a necessidade da intensificação dos estudos em relação a essa abordagem. Em vez de estudarem-se as curvas de probabilidade, em alguns casos o estudo dos momentos estatísticos dos dados se torna mais eficaz. Esses são definidos pela expressão abaixo:

$$M_x = \int_{-\infty}^{+\infty} x^n P(x) dx \quad n=1, 2, 3, \dots, m, \quad (7)$$

Onde $P(x)$ é a função densidade de probabilidade de uma amplitude instantânea x . O primeiro e segundo momentos são bem conhecidos, correspondentes ao valor médio e a variância, respectivamente. O terceiro momento normalizado pelo cubo do desvio padrão é conhecido como coeficiente de assimetria (*skewness coefficient*). O quarto momento, normalizado pela quarta potência do desvio padrão, é particularmente útil, correspondente ao coeficiente de curtose. Esse pode ser obtido pela expressão abaixo:

$$\beta_2 = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} (x - \bar{x})^4 P(x) dx}{\sigma^4} \quad (8)$$

Onde \bar{x} é a média.

DYER E STEWART [16] foram os primeiros a propor o uso do coeficiente de curtose para a detecção de falhas. Para um rolamento sem defeitos com uma distribuição gaussiana, o valor do coeficiente de curtose é próximo a 3. Um valor superior ao citado é considerado como uma indicação de uma falha iminente. Entretanto, percebe-se que esse valor se reduz à medida que o defeito atinge estágios avançados, o que caracteriza uma desvantagem para confiabilidade de diagnósticos feitos a partir de sua utilização. Alguns estudos apontam ineficiências na detecção de falhas incipientes. Logo, esse método não se tornou popular na indústria para o monitoramento de mancais de rolamento.

3.4. Técnicas no Domínio da Frequência

Segundo N.TANDON e A. CHOUDHURY[2,3], 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 das equações apresentadas no subitem 3.1.

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, os autores acima citados afirmam que 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 12, abaixo, mostra um desenho esquemático representativo de tal mudança.

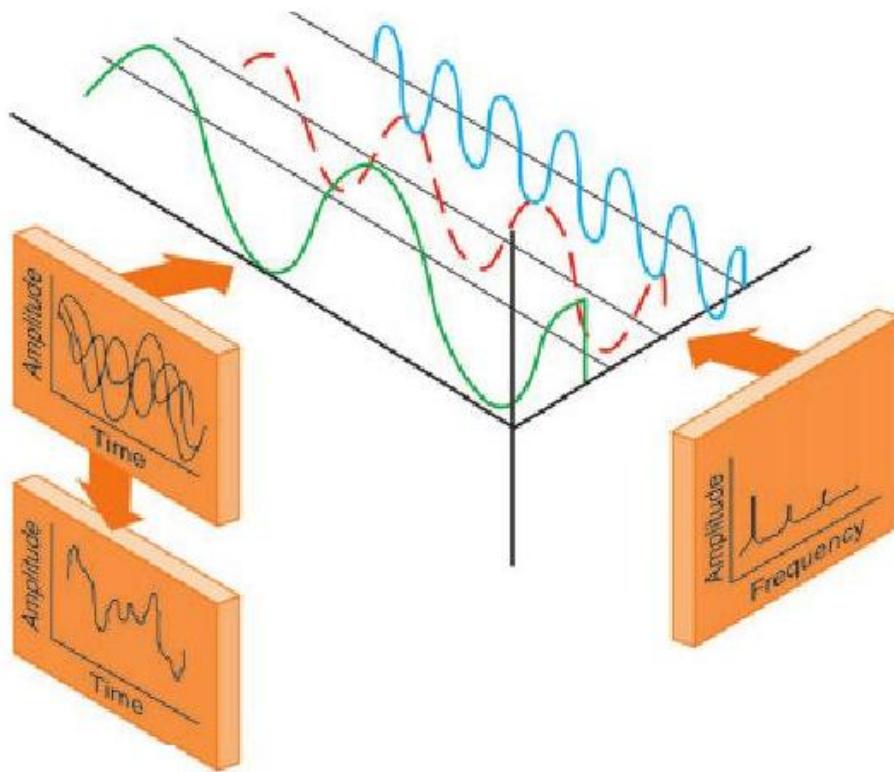


Figura 12 – Exemplo de mudança entre domínios do Tempo e de Frequência

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 13. A FFT se diferencia da Transformada de Fourier por possuir uma menor complexidade e envolver um menor esforço computacional para resolução.

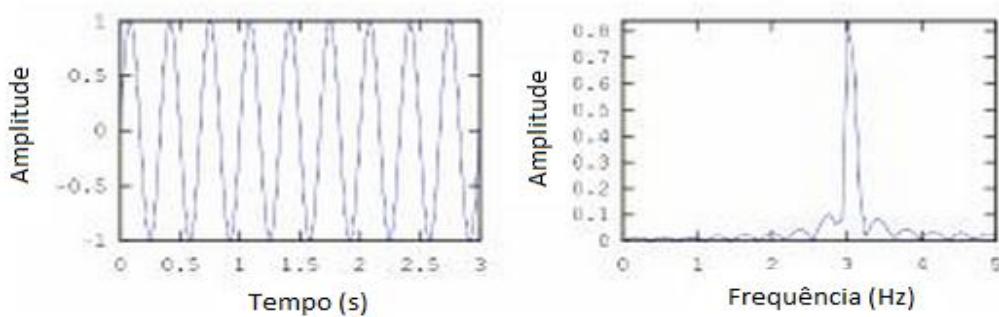


Figura 13 – Exemplo de aplicação da FFT

Outra técnica em destaque para a avaliação das condições de mancais de rolamento é a **Análise de Envelope**. Como já mencionado, a detecção das frequências características de falhas, apresentadas no subitem 3.1, é difícil de ser realizada por meio da utilização de uma

análise espectral simples. Segundo RANDALL et al [13], mesmo após a ampliação da FFT, os componentes de vibração espúrios podem contaminar o espectro com frequências indesejadas à análise, tornando-o mais complexo e limitando a resolução do gráfico da FFT. Logo, a Análise do Envelope foi desenvolvida com principal intuito de trocar a análise de frequências com uma ampla faixa de frequências portadoras, para uma faixa menor de frequências de falhas, o que permite sua análise com uma boa resolução.

Na prática, a utilização dessa técnica segue os seguintes passos:

- i. Inicia-se com a mudança de domínio do tempo para o domínio da frequência por meio da FFT.
- ii. Em seguida, ocorre a filtragem do sinal por meio de um filtro-passa banda em torno de uma frequência de falha ou de alterações indicadas a partir da observação do gráfico da FFT.
- iii. Este sinal filtrado pode ser então demodulado a fim de eleminar-se as componentes de alta energia, o que permite uma detecção mais precoce e precisa dos defeitos do rolamento. Duas abordagens podem ser utilizadas para a realização da demodulação: a) contrução de um sinal analítico complexo, no domínio do tempo, por meio da transformada de Hilbert, no qual a parte imaginária é a transformada de Hilbert da parte real; b) retificação e suavização do sinal por meio de um filtro passa-baixa, buscando-se eliminar a frequência portadora.
- iv. Calcula-se o espectro do sinal do envelope, tomando-se a envoltória das amplitudes, em módulo, do gráfico obtido no passo anterior.
- v. Através do emprego da FFT, é realizada uma nova mudança de domínio para possibilitar a extração das frequências características de falha do mancal.

A extração do envelope do sinal utilizando-se a Transformada de Hilbert segue a sequência descrita na Figura 14 e exemplificada na Figura 15, abaixo:



Figura 14 – Etapas do Método de análise do envelope utilizando a transformada de Hilbert.

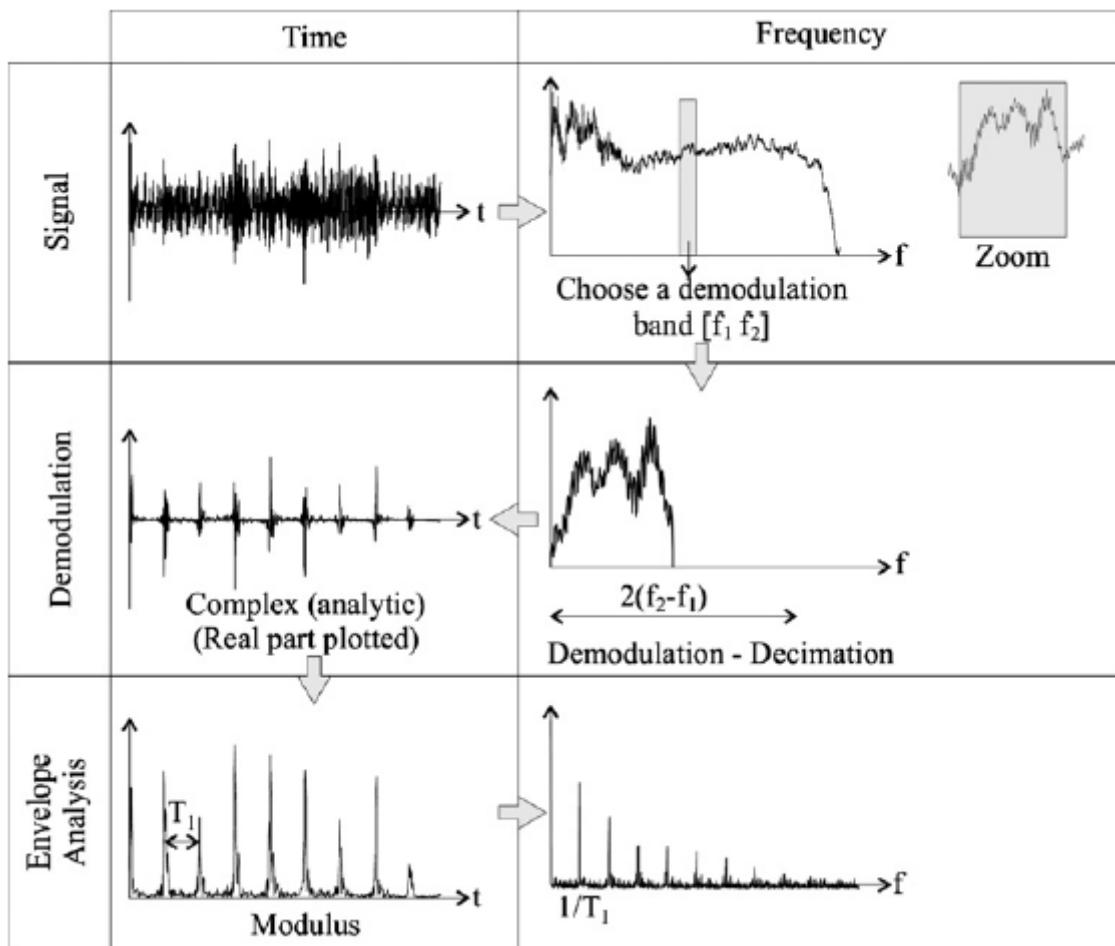


Figura 15 – Procedimento de análise do envelope utilizando a transformada de Hilbert (RANDALL e ANTONI, 2011).

Outra técnica bastante comentada nas referências bibliográficas pesquisadas, é o **Cepstrum**. A motivação para seus estudos e indicações se justifica em sua capacidade de identificar famílias de harmônicos presentes no sinal, gerados por bandas laterais moduladas na frequência de rotação do mancal, por exemplo. Essa técnica consiste na transformada inversa da transformada de Fourier do logaritmo do espectro de potência. Além do emprego citado anteriormente, essa técnica pode ser empregada para remoção de algumas séries hamônicas do espectro.

Segundo N.TANDON e A. CHOUDHURY[2,3], esse método tem se mostrado eficiente na análise de falhas na pista externa. Essa foi a técnica utilizada por DIEZEL[20] em uma análise de falhas em mancais de rolamento do rotor kit;

3.5. Técnicas no Domínio Tempo-Frequência

O monitoramento de máquinas rotativas, em geral, é desenvolvido por meio de aquisições de sinais em operações com velocidades constantes, gerando componentes em frequência que não variam com o tempo, também denominadas componentes estacionárias. Essas componentes merecem atenção uma vez que podem conter informações úteis para o diagnóstico de uma falha. Nesses casos, foi visto que técnicas como a FFT podem ser empregadas no estudo das características espectrais do sinal no domínio da frequência.

Entretanto, em situações mais complexas, como no caso da ocorrência de deslizamento dos elementos rolantes, surgem componentes não estacionárias no sinal. Trabalhando-se com sinais transientes ou sinais obtidos em detecções utilizando-se máquinas rotativas com rotação variável, torna-se mais adequada a análise da variação das componentes presentes no espectro, no do domínio do tempo. Essa constatação configurou uma restrição para o emprego de técnicas como a FFT, o que nos últimos anos conduziu ao desenvolvimento de técnicas de processamento de sinais capazes de fornecer representações tempo-frequência do sinal.

A seguir serão comentadas algumas dessas técnicas a fim de se obter uma contextualização teórica sobre a variedade de métodos existentes na atualidade.

A **Distribuição de Wigner-Ville (WVD)** constitui-se numa representação básica no domínio do tempo-frequência capaz de fornecer informações úteis, relativas à variação no tempo dos sinais não estacionários. Essa técnica apresenta boa resolução no plano tempo-frequência, porém tem como ponto negativo o fato de incorporar interferências quando sinais formados por mais de uma componente espectral são analisados.

A **Transformada de Fourier de Curta Duração (STFT)** consiste no fracionamento do sinal não estacionário em intervalos suficientemente pequenos, visando reduzir suas características não estacionárias. Dessa forma, assume-se a estacionariedade do sinal em cada intervalo, permitindo a aplicação da FFT. O novo espectro obtido revela como o conteúdo da frequência do sinal está variando com o tempo. Devem-se enfatizar as características do sinal apenas nas proximidades do instante de interesse. Logo, utiliza-se uma janela de observação visando fornecer uma divisão adequada do sinal. Entretanto, sabe-se pelo princípio de Heisenberg que a largura dessa janela pode representar um ponto negativo na aplicação dessa técnica, já que no domínio da frequência essa técnica pode até apresentar boa resolução, mas fornece uma resolução pobre no domínio do tempo. Logo, a largura da janela de observação constitui um fator limitante ao emprego da STFT

A **Transformada Wavelet** considera a utilização de escalas menores quando se deseja a obtenção de maior resolução das informações contidas no sinal em alta frequência e escalas maiores quando se deseja maior resolução nas informações de sinais de baixa frequência. Essa utilização de escalas variáveis constitui um avanço em relação a técnica STFT. Esta consiste na busca por famílias de funções chamadas *wavelet* filhas, por meio de operações de dilatação e translação da *wavelet* mãe. As capacidades de multiresolução e localização no tempo tornam essa técnica muito útil para aplicações em diagnósticos de falha.

4. Resumo Bibliográfico

A pesquisa bibliográfica foi uma etapa importante na elaboração do presente trabalho, por permitir o acesso a conhecimentos teóricos, orientações sobre as técnicas, estratégias para o desenvolvimento de estudos de caso e validações relativas à eficácia da técnica do envelope.

Uma revisão da técnica do envelope foi apresentada por MCFADDEN e SMITH [6]. Segundo esses autores, toda vez que um defeito atinge um elemento em contato, é gerado um pulso de curta duração que excita ressonâncias periodicamente, caracterizado pela frequência das falhas relacionadas à localização do defeito. Essas ressonâncias aparecem moduladas em amplitudes nas frequências de falha. O estudo destes autores mostra bons resultados na aplicação da demodulação de uma dessas ressonâncias, no qual foram gerados sinais indicativos da condição do rolamento. Em seus estudos, foi desenvolvido um modelo simples de vibração para explicar o aparecimento de várias linhas espectrais causadas por diferentes localizações de defeitos no espectro demodulado. Os autores sugerem que as bandas laterais em torno da frequência de falha seja um resultado da demodulação da frequência portadora pelo caminho de transmissão do sinal e carregamento do eixo.

SU e LIN [9] estenderam os estudos acerca do modelo proposto pelos autores citados acima, a fim de caracterizar as vibrações de mancais sujeitos a várias cargas.

MARTIN e THORPE [10] sugerem, em seus estudos, uma normalização do espectro de frequências detectado pelo envelope em rolamentos defeituosos em relação a mancais em bom estado, com vistas a aumentar a sensibilidade de detecção das frequências de falha. Segundo os autores, uma limitação dessa técnica é o fato das frequências de falha se tornarem imersas em um plano de fundo causado pelas frequências espúrias originadas à medida que o mancal se deteriora. Isso ocorre devido a uma redução na severidade dos impactos, os quais passam a ser gerados tão frequentemente que se tornam reduzidos pelo decaimento do impacto anterior.

Entretanto, BURGESS [19] argumenta que o fenômeno apresentado por Martin e Thorpe se justifica no fato de as frequências de falha se tornarem aleatórias à medida que os defeitos progredem. Com isso, ocorre uma redução da diferença entre as amplitudes de ruídos aleatórios e das frequências de falha.

TANDOM e CHOUDHURY [2,3] afirmam que medições no domínio da frequência apresentam a vantagem permitir a localização dos defeitos. Segundo os autores, a Técnica do Envelope se mostra como a mais popular, com resultados decorrentes de aplicações bem sucedidas por diversos autores. O procedimento de aplicação para essa técnica está bem estabelecido. Além disso, existem explicações satisfatórias na literatura acerca do uso do espectro demodulado resultante. Os autores afirmam ainda que essa técnica possui a desvantagem de apresentar dificuldades na detecção e localização de falhas em mancais com defeitos avançados. Finalmente, os autores apontam a utilização da Transformada Wavelet como recurso para extração de sinais muito fracos, para os quais a transformada de Fourier se torna ineficaz.

PONCI e CUNHA [8] afirmam que as vibrações de alta frequência geradas pelos defeitos de rolamentos possuem intensidade bastante reduzida em comparação com as amplitudes dos componentes de baixa frequência, relacionados com defeitos de alta energia como: desbalanceamento, desalinhamento, folgas e etc.. Segundo os autores, a grande vantagem do processo de demodulação é a eliminação de componentes de alta energia, permitindo detectar com maior precisão e antecedência apenas os defeitos do rolamento. Além disso, apontam que a análise do envelope permite determinar taxas de repetição dos impactos que geram as ondas de tensão, identificando sua origem, ou seja, os componentes defeituosos do rolamento. Em seu estudo, os autores validaram estes conceitos através da aplicação da técnica do envelope para a detecção de falhas em um mancal de uma bomba de alimentação de caldeira.

RANDALL e ANTONI [13] também abordam vantagens da demodulação em amplitudes a partir da Transformada de Hilbert, presente na técnica do envelope. Essa transformada gera um sinal analítico complexo no domínio do tempo, cuja parte imaginária corresponde a transformada de Hilbert da parte real. No estudo é apontado o benefício imediato dessa aplicação: a extração de uma seção do espectro a ser demodulada constitui um filtro eficiente, capaz de separá-la dos componentes adjacentes que podem ser muito mais fortes. Além disso, os autores propuseram uma metodologia genérica para diagnóstico de falha em mancais de rolamentos. Tal método já fora aplicado a uma ampla gama de casos, de turbinas a gás de alta velocidade a mancais de torres de radar com período rotacional de 12 segundos. O método consiste em aplicar uma técnica conhecida como Deconvolução de Mínima Entropia (*Minimum Entropy Deconvolution*) para livrar o sinal dos efeitos do caminho de transmissão, melhorando a curtose.

SAWALHI et al. [14] em seu artigo, verificou o sucesso da técnica de Deconvolução de Mínima Entropia. Segundo o autor, a melhor banda para demodulação é escolhida utilizando o curtograma rápido. Finalmente, as falhas são avaliadas utilizando a técnica do envelope.

MESQUITA et al. [17] obtiveram resultados satisfatórios para aplicação da técnica do envelope, uma vez que, em seus estudos, foi possível a identificação de uma falha intencionalmente introduzida em um mancal de rolamento. Essa técnica conseguiu identificar frequências de falha, tanto na condição de pista estacionária quanto na de pista girando, esta última provocando uma modulação em amplitude do sinal do defeito. Segundo os autores, esse efeito ficou bem caracterizado no gráfico apresentado, através da presença de componentes laterais no espectro, com valor da frequência da modulação (rotação da máquina). Além disso, foi proposta uma comparação entre a técnica citada e a aplicação de transformações tempo-frequência que, além de identificarem as falhas, conseguem também localizá-las no tempo. Os autores afirmam que através da técnica de *Wavelets*, foi possível identificar claramente as falhas através da visualização de aumento de energia na região do plano tempo-frequência que corresponde à falha.

5. Desenvolvimento do *Software* de Análise do Sinal de Vibração

O presente trabalho utiliza a plataforma Labview® (*Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench*) para o desenvolvimento do *software* utilizado para a confecção das análises de detecção de falhas. Esse programa permite a criação de sistemas de medição e controle que podem ser aplicadas no desenvolvimento das análises de sinais provenientes de mancais de rolamento utilizando a técnica da Análise do Envelope. A Figura 16 apresenta a interface do *software* desenvolvido:

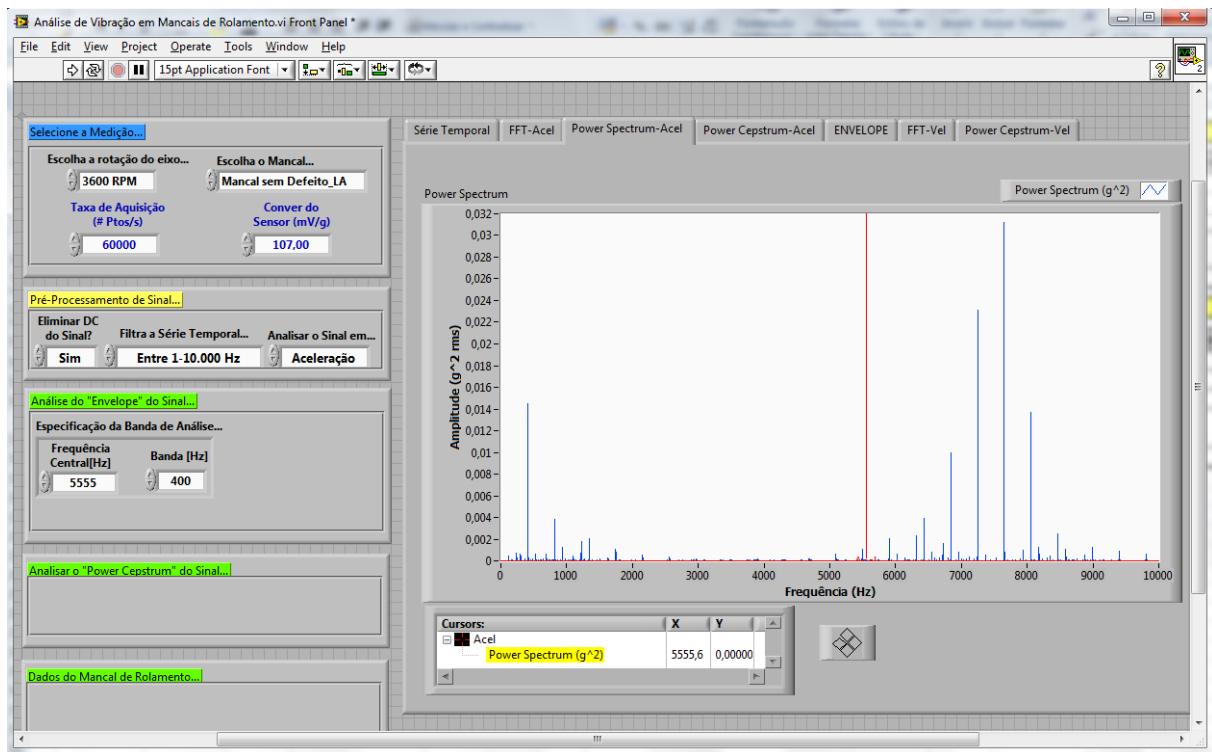


Figura 16 – Interface do *Software* de Análise de Vibração.

6. Estudo de Caso

Conforme mencionado no capítulo 3, verifica-se a utilização de duas abordagens em estudos de respostas de vibração em mancais de rolamento: submeter o rolamento a operação contínua até a falha do mesmo ou introduzir intencionalmente um defeito no rolamento, posteriormente comparando as frequências obtidas com dados calculados teoricamente. Considerando-se um melhor aproveitamento do tempo, a segunda abordagem citada foi escolhida como estratégia para a realização da aquisição dos sinais. Logo, tais sinais foram adquiridos para quatro mancais contendo falhas diferentes. Esses foram montados, um de cada vez, em um rotor-kit modelo ABVT (*Alignment / Balance Vibration Trainer*) para possibilitar a simulação de uma máquina rotativa em operação. Os mancais e o rotor-kit podem ser vistos nas Figuras 17 e 18.



Figura 17 – Mancais defeituosos utilizados no experimento

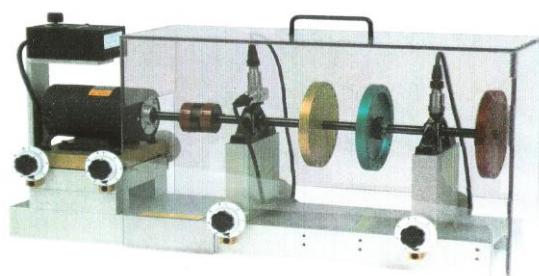


Figura 18– Rotor Kit ABVTTM.

As informações técnicas a respeito dos mancais do rotor-kit são as seguintes:

- Número de elementos rolantes: 8 esferas;

- Diâmetro da esfera: 0,7145 cm;
- Diâmetro da gaiola: 2,8519 cm;
- FTF: 0,375 CPM/RPM;
- BPFO: 2,998 CPM/RPM;
- BPFI: 5,002 CPM/RPM;
- BSF: 1,871 CPM/RPM;
- BDF, Ball Defect Frequency, (frequência de falha num elemento defeituoso, considerando rolamento puro): 3,742 CPM/RPM;

Os sinais de vibração foram adquiridos na direção vertical, com uma taxa de aquisição de 60.000 amostras por segundo, durante 10 segundos, totalizando 600.000 amostras e tendo um espectro com frequência final máxima de 30.000 Hz. Contudo, o acelerômetro utilizado na medição responde linearmente até 10.000 Hz, e a sua freqüência de ressonância é 16.000 Hz. Foi utilizada uma taxa de aquisição de 60 KHz a fim de identificar as zonas de ressonância.

Os dados foram adquiridos em três rotações diferentes: 800 RPM, 1800 RPM e 3600 RPM. A série temporal obtida para o mancal 1, para a rotação do eixo de 800 RPM, é mostrada na Figura 19 a título de exemplificação da utilização do *Software* desenvolvido.

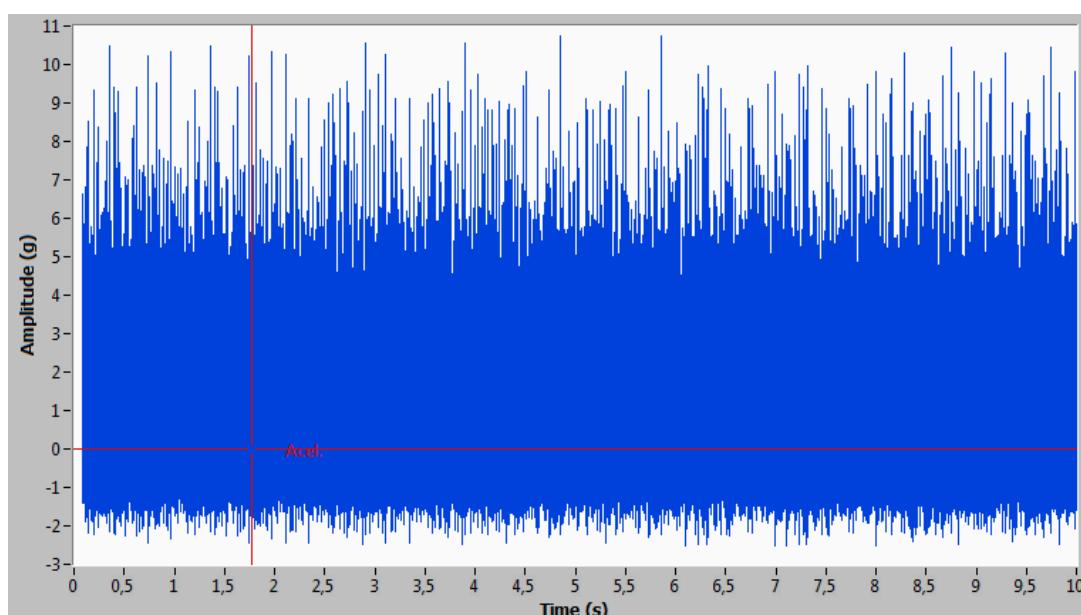


Figura 19 - Série temporal mancal 1 - 800 RPM

Percebe-se que a resolução dos dados obtidos no domínio do tempo revela-se incapaz de fornecer informações úteis à aplicação das técnicas comentadas nas seções precedentes, já que o excesso de superposições impossibilita a identificação de uma ou mais frequências em particular. Conforme visto anteriormente, além de esperada, essa constatação configura uma demanda pela utilização de outras técnicas que proporcionem melhores resoluções dos dados a fim de viabilizar as análises.

De acordo com as referências bibliográficas apresentadas nas seções anteriores, é necessário identificar as frequências de rotação do eixo, bem como seus harmônicos. Essa identificação é necessária para a realização de uma distinção adequada entre as frequências de rotação e as frequências características de defeitos. As frequências de rotação do eixo para as três rotações podem ser visualizados na Tabela 1.

Tabela 1 - Cálculo da frequência de rotação para as três rotações

| RPM | Hamônicos da Rotação do Eixo | | |
|---------|------------------------------|-----------|-----------|
| | 1 (Hz) | 2 (Hz) | 3 (Hz) |
| 800,00 | 13,33 | 26,67 | 40,00 |
| 1800,00 | 30,00 | 60,00 | 90,00 |
| 3600,00 | 60,00 | 120,00 | 180,00 |

Em seguida, foi feita uma varredura em cada mancal a fim de verificar a consistência dos cálculos das frequências de rotação do eixo e seus harmônicos. Essa varredura consistiu, preliminarmente, na geração de um gráfico no domínio da frequência fazendo-se uso da FFT, conforme abordado no subitem 3.4. No gráfico gerado, foi feita uma pesquisa para confirmar a ocorrência de tais frequências. Verificou-se, entretanto, que para algumas rotações, as frequências de rotação do eixo apresentaram uma pequena variação em relação àquelas calculadas teoricamente. Investigações sobre possíveis causas indicaram que isso se deve a uma imprecisão instrumental relacionada ao estabelecimento das rotações as quais o rotor foi submetido no decorrer dos experimentos. Como os valores foram próximos e tiveram coerência em relação ao surgimento de seus harmônicos, optou-se por manter as frequências de rotação observadas no gráfico FFT e corrigir os valores de rotação do eixo. Dessa forma, foram obtidas as rotações e respectivas frequências apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Rotações e frequências de rotação corrigidas

| RPM | Hamônicos da Rotação do Eixo | | |
|---------|------------------------------|--------|--------|
| | 1 | 2 | 3 |
| 786,00 | 13,10 | 26,20 | 39,30 |
| 1788,00 | 29,80 | 59,60 | 89,40 |
| 3600,00 | 60,00 | 119,20 | 180,00 |

O próximo passo consistiu no cálculo das frequências de falha, as quais são determinadas teóricamente por meio das expressões apresentadas no subitem 3.1. Na presente pesquisa, tais frequências foram calculadas a partir das frequências de falha fornecidas pelo fabricante dos mancais defeituosos. O cálculo empregado e as frequências obtidas para cada rotação do eixo podem ser visualizados na Tabela 3.

Tabela 3 – Cálculo das frequências características de falhas.

| FALHA | CPM/RPM | Freq. de Falha | | |
|-----------|---------|----------------|---------|---------|
| | | 786,00 | 1788,00 | 3600,00 |
| FTF (Hz) | 0,375 | 4,91 | 11,18 | 22,50 |
| BSF (Hz) | 1,871 | 24,51 | 55,76 | 112,26 |
| BPFO (Hz) | 2,998 | 39,27 | 89,34 | 179,88 |
| BPFI (Hz) | 5,002 | 65,53 | 149,06 | 300,12 |

Em seguida, uma vez determinadas as frequências características de defeitos, o próximo passo correspondeu a uma varredura dos gráficos gerados pelo *software* em busca da detecção das mesmas. Para os quatro mancais, a metodologia utilizada consistiu na seguinte sequência:

i. Geração do gráfico FFT:

Conforme visto, o uso da série temporal não gera recursos suficientes para o desenvolvimento das análises. Logo, é gerado um gráfico FFT a fim de permitir as pesquisas iniciais. Vale ressaltar que o espectro de vibração tem um limite superior em frequência devido à frequência natural do acelerômetro empregado na aquisição de dados. Como sua frequência natural se equivale a aproximadamente 16 kHz, na prática os dados adquiridos passam a sofrer uma intensificação em amplitude quando os níveis de frequência aproximam-

se desse valor. Para evitar a aquisição de dados inconsistentes, considera-se que esse efeito surge a partir de 10kHz, como consequência das ressonâncias geradas pelo próprio acelerômetro. Dessa forma, as varreduras que compõe a presente pesquisa são limitadas em 10 kHz, conforme mostrado na Figura 20 para o mancal 1 a 800 RPM.

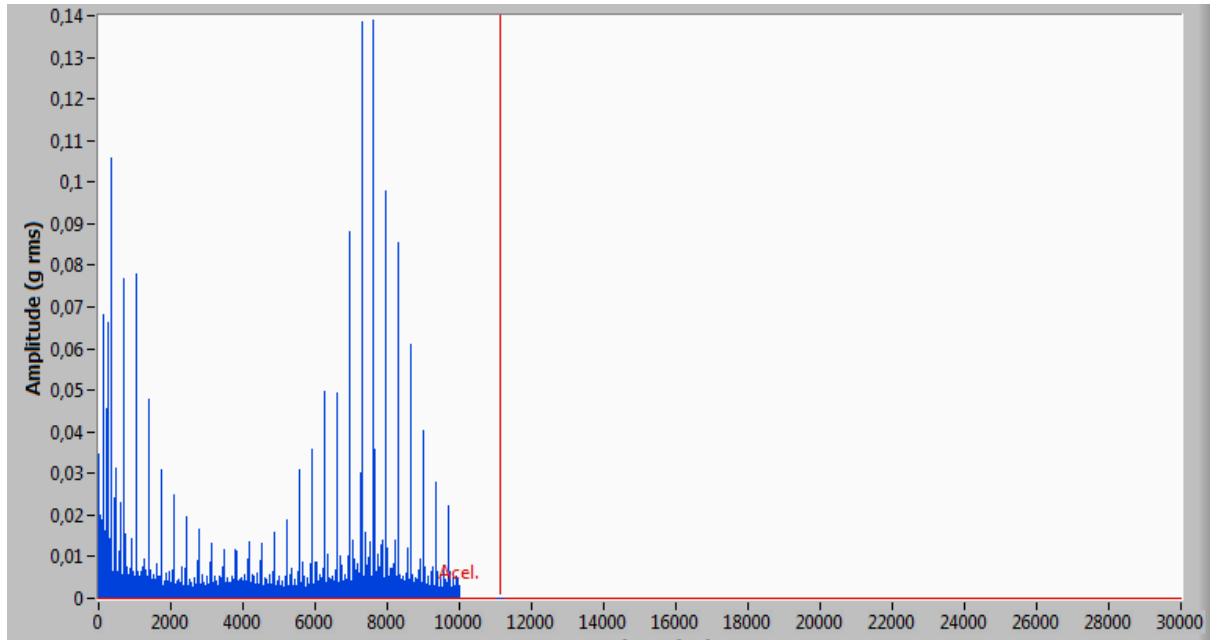


Figura 20 – Gráfico FFT para o mancal 1 a 800 RPM, limitado a 10 kHz.

ii. Varredura Preliminar no Gráfico FFT:

Em alguns casos, esse gráfico forneceu resolução suficiente para o desenvolvimento de uma varredura preliminar em busca da detecção de frequências que poderiam estar relacionadas a defeitos. No entanto, em geral, houve uma perda de resolução do gráfico FFT para rotações mais elevadas, tornando as varreduras menos eficazes.

Alterando-se os limites inferior e superior do eixo das abscissas, é possível um aumento de resolução do gráfico, o que permite uma maior precisão na leitura dos resultados obtidos. A Figura 21 exemplifica essa técnica aplicada ao mancal 1 a 800 RPM , onde o limite superior foi reduzido de 10kHz para 2 kHz. Com isso, foi possível ajustar o software para uma rodada preliminar de geração de gráficos FFT limitada entre 1 Hz e 2 kHz.

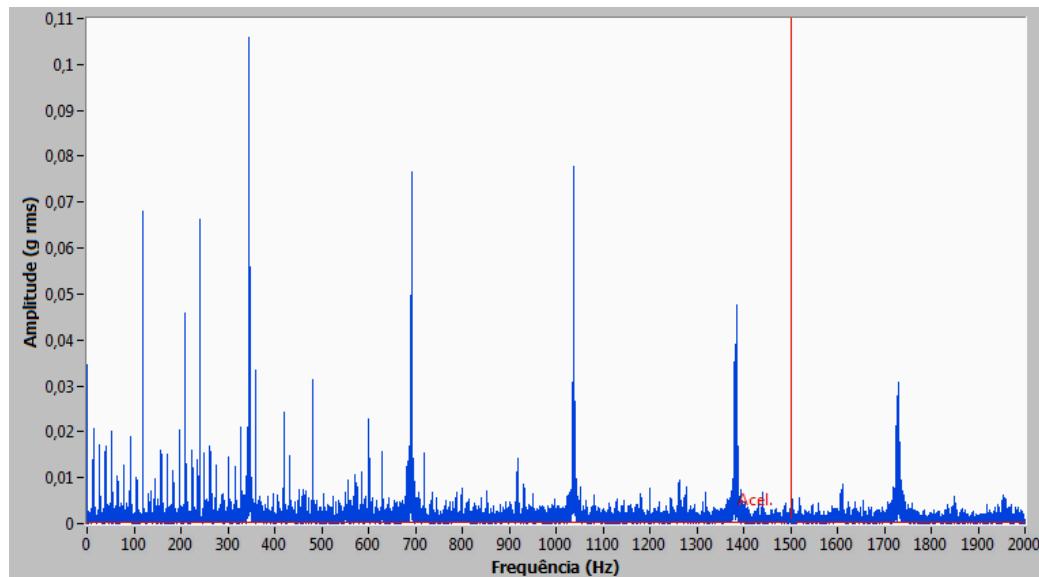


Figura 21 – Gráfico FFT limitado em 2 kHz, para o mancal 1 a 800 RPM

Considerando esse intervalo, realizou-se uma varredura no gráfico visando identificar possíveis ocorrências de frequências características de falhas. Essa varredura resultou na identificação de um número significativo de ocorrências para as frequências de falha na gaiola (FTF) e falha na pista interna (BPFI), as quais estão apresentadas nas Tabelas 4 e 5 para o mancal 1:

Tabela 4 – Varredura no gráfico FFT – Frequências de Falha na Gaiola (FTF)

| Rotação (RPM) | Harmônico da Rotação mais Próximo (Hz) | FTF (Hz) | | | | | |
|------------------|--|------------------------------|-------------------|-------------------|-----------------|--------------------------------|----------|
| | | Harmônico da falha (#) | Calculado (Hz) | Variação (<2%) | Gráfico (Hz) | Gráfico (acel) (g pk-pk) | |
| 788,00 | - | 694,30 | 141 | 692,66 | 0,03 | 692,90 | 0,014330 |
| | | 1048,00 | 210 | 1031,63 | 0,63 | 1038,10 | 0,006666 |
| | | 1310,00 | 280 | 1375,50 | 0,61 | 1383,85 | 0,008443 |
| | | 1703,00 | 352 | 1729,20 | 0,10 | 1731,00 | |
| 1788,00 | | 745,00 | 66 | 737,55 | -0,59 | 733,20 | 0,040800 |
| | | 1102,60 | 98 | 1095,15 | 0,42 | 1099,80 | 0,013089 |
| | | 1460,20 | 131 | 1463,93 | 0,01 | 1464,10 | 0,005923 |
| | | 1847,60 | 164 | 1832,70 | 0,02 | 1833,10 | 0,006578 |
| 3600,00 | 1060,00 | 47 | 1057,50 | -0,16 | 1055,80 | 0,012300 | |

Tabela 5 – Varredura no gráfico FFT – Frequências de Falha Pista Interna (BPFI)

| Rotação (RPM) | Harmônico da Rotação mais Próximo (Hz) | BPFI (Hz) | | | | |
|------------------|---|------------------------------|-------------------|-------------------|-----------------|--------------------------------|
| | | Harmônico da falha (#) | Calculado (Hz) | Variação (<2%) | Gráfico (Hz) | Gráfico (acel) (g pk-pk) |
| 788,00 | 589,50 | 9 | 589,74 | 1,72 | 599,90 | 0,022801 |
| | 720,50 | 11 | 720,79 | -0,11 | 720,00 | 0,015380 |
| | 917,00 | 14 | 917,37 | 0,08 | 918,10 | 0,014121 |
| | 1270,70 | 19 | 1245,00 | 1,51 | 1263,80 | 0,008177 |
| | 1637,50 | 25 | 1638,16 | -1,66 | 1611,00 | 0,008463 |
| 1788,00 | 596,00 | 4 | 596,24 | 0,65 | 600,10 | 0,012319 |
| | 745,00 | 5,00 | 745,30 | -1,62 | 733,20 | 0,079085 |
| | 1043,00 | 8 | 1043,42 | 5,14 | 1097,10 | 0,049972 |
| | 1341,00 | 9 | 1341,54 | 0,03 | 1342,00 | 0,009250 |
| | 1490,00 | 10 | 1490,60 | -1,65 | 1466,00 | 0,035002 |
| 3600,00 | 900,00 | 3,00 | 900,36 | 0,07 | 901,00 | 0,015322 |
| | 1200,00 | 4,00 | 1200,48 | 0,03 | 1200,80 | 0,010590 |
| | 1500,00 | 5,00 | 1500,60 | 0,10 | 1502,10 | 0,007051 |

Percebe-se pelos valores das amplitudes, que as ocorrências para BPFI tiveram valores superiores em relação à FTF, o que pode sugerir uma predominância desse tipo de falha. Entretanto, as frequências obtidas aproximam-se de harmônicos da frequência de rotação do eixo, o que abre margem para a possibilidade de tais ocorrências serem influenciadas apenas pela passagem dos elementos rolantes pela zona de carregamento do rolamento. Logo, se faz necessária a intensificação de pesquisas por meio de combinações com outras técnicas de análise de sinais.

iii. Seleção das Bandas de Frequências:

Com o gráfico FFT, é possível a identificação das bandas de frequências suspeitas de conter defeitos, através da comparação entre as amplitudes de um mancal defeituoso e um mancal sem defeito. A correta identificação de tais bandas é imprescindível para a aplicação da técnica tema central desta pesquisa, a Análise do Envelope. Dessa forma, foi realizada uma comparação entre os espectros de 1 a 10 kHz presentes nos gráficos FFT dos mancais defeituosos e sem defeito para as três rotações do eixo, exemplificada na Figura 22.

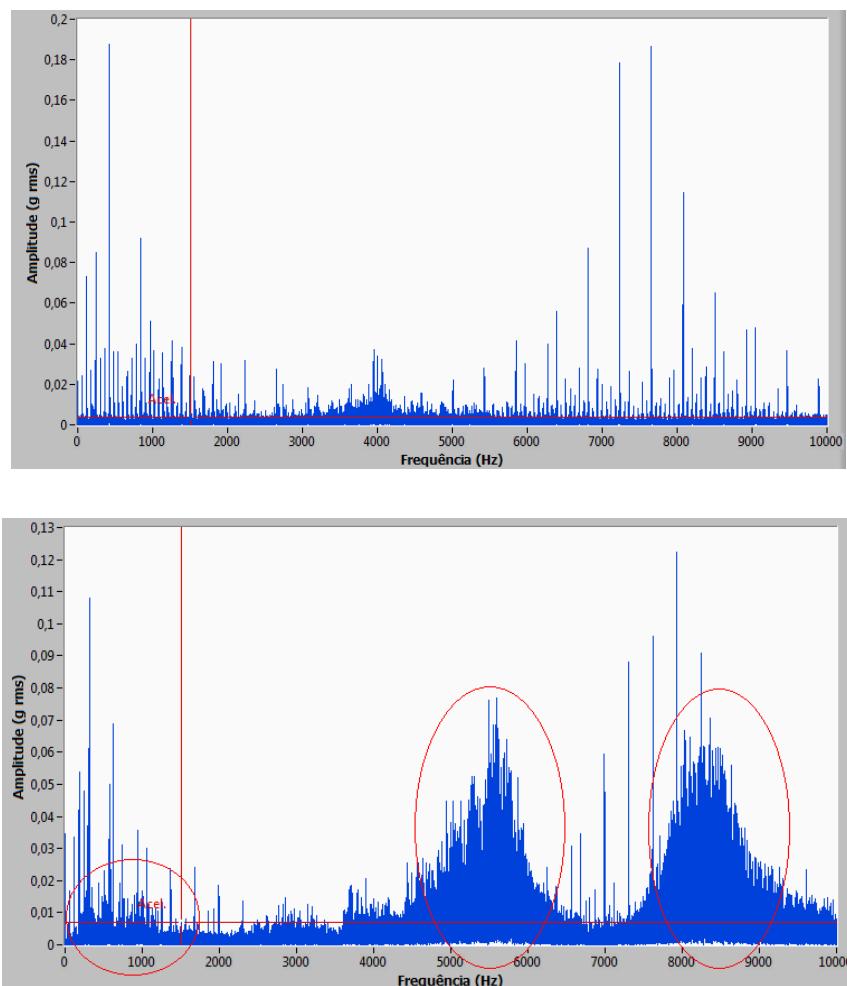


Figura 22 – Comparação entre Gráficos FFT para o mancal Sem Defeito e Mancal 1, respectivamente, a 3600 RPM.

As figuras acima são referentes a uma rodada de processamento para os mancais 1 e sem defeito, submetidos a 3600 RPM. Pode-se notar claramente o surgimento de ressonâncias nas faixas de 5 kHz a 6 kHz e 8 kHz a 9 kHz. Além disso, percebe-se um aumento concentrado de amplitudes em torno de 600 Hz. Dessa forma, constata-se a necessidade de investigar que frequências influenciam essas ressonâncias. Portanto, fica estabelecida uma banda central, correspondente à frequência de maior amplitude na região que apresenta a

variação no espectro, e uma banda lateral, correspondente a largura das alterações de amplitude. Essa banda pode ser vista na Figura 23 e seus valores, na Tabela 6.

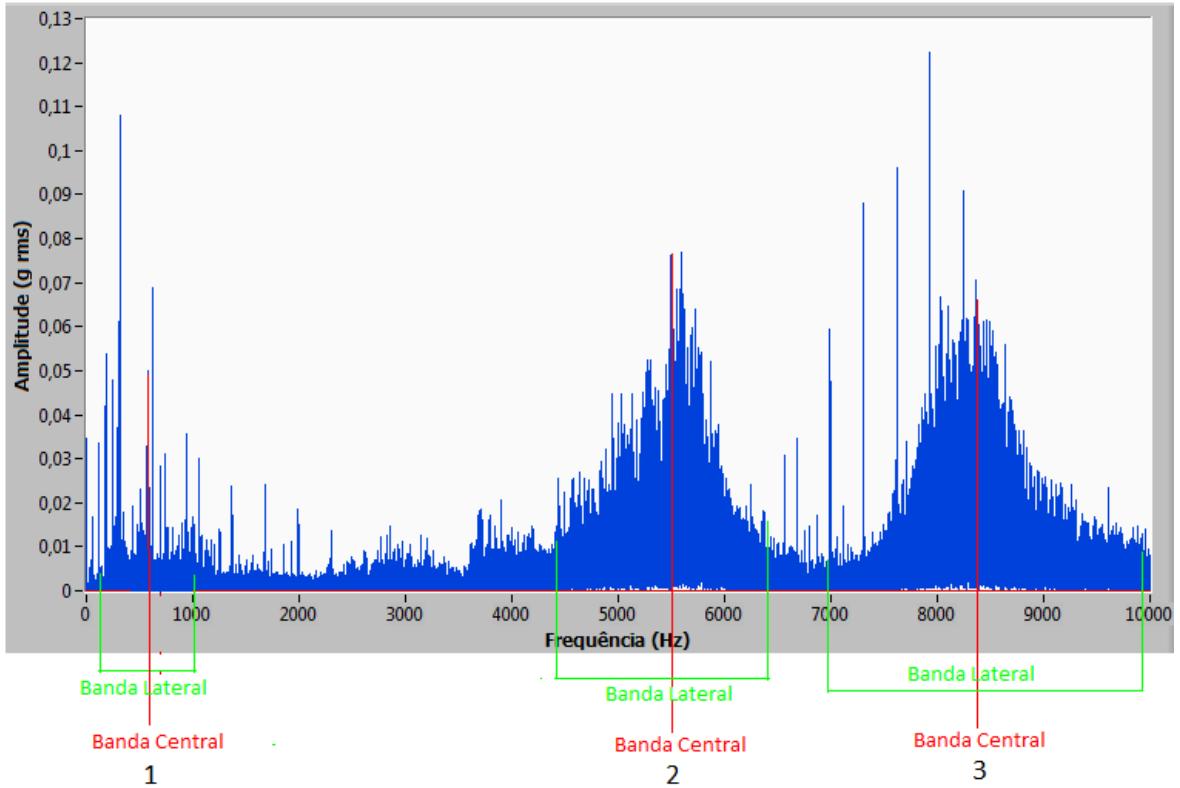


Figura 23 – Bandas Centrais e Laterais para o mancal 1, a 3600 RPM

Tabela 6 – Valores para as Bandas Central e Lateral obtidas para o mancal 1 a 3600 RPM.

| | Banda Central (Hz) | Banda lateral (Hz) |
|---|--------------------|--------------------|
| 1 | 500 | 1000 |
| 2 | 5600 | 2000 |
| 3 | 8300 | 3000 |

iv. Geração do Gráfico do Envelope:

Essa etapa correspondeu a varredura principal da análise, já que essa técnica corresponde ao objeto principal em estudo. Foram selecionados os picos de frequências que apareciam de forma mais significativa no espectro do envelope obtido para a banda escolhida. O critério de seleção desses picos consistiu no registro de sinais com amplitudes superiores a 0,005 (g^2 pk-pk), já que esses se destacaram dentre as demais frequências que formaram o plano de fundo do espectro, provavelmente associadas a ruídos e componentes espúrios. Além

disso, optou-se por dar atenção especial para amplitudes superiores a 0,01 (g^2 pk-pk), visando uma maior confiabilidade nos diagnósticos. Em seguida, esses sinais registrados eram comparados com as frequências de rotação do eixo e frequências características de defeitos, respeitando-se uma variação máxima de 2% a fim de considerar o efeito de deslizamento. As ocorrências de frequências de falha identificadas no espectro que não coincidiram com frequências de rotação do eixo e respeitaram a variação máxima, foram utilizadas para demonstrar uma tendência de ocorrência da respectiva falha.

Na prática, a geração do envelope do sinal iniciou-se com a entrada das bandas identificadas na etapa anterior nos respectivos campos do *software*. Isso possibilitou a rodada de processamento e geração do gráfico, como mostrado na Figura 24:

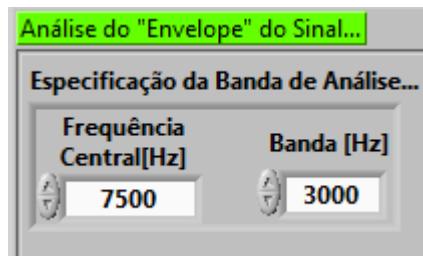


Figura 24 – Exemplo do Campo para especificação das bandas de análise no *software*.

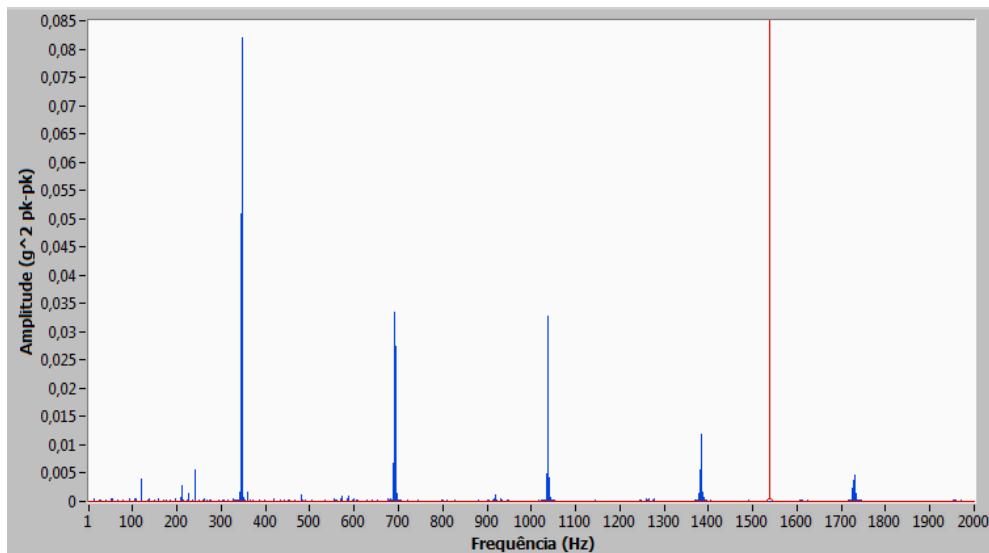


Figura 25 – Gráfico gerado a partir da Análise do Envelope para o mancal 1 a 800 RPM em uma banda central de 7500 e lateral de 3000.

O gráfico mostrado da Figura 25 foi gerado considerando-se uma banda central de 7,5 kHz e banda lateral de 3 kHz. A ampla largura da banda se justifica em uma abordagem

conservadora, visando garantir a inclusão de todas as possíveis frequências que estejam modulando o sinal adquirido.

v. Tabela de Frequências:

Para organizar os dados obtidos a partir das comparações, foi desenvolvida uma tabela de frequências para cada mancal estudado, visando permitir a identificação das frequências de falha mais significativas. Dessa forma, foi possível associar as falhas com maiores chances de estarem presentes em seus respectivos mancais.

Após a geração dos gráficos do envelope, é feita uma nova varredura com objetivo de detectar a ocorrência de frequências características de falhas. Na Tabela 7 estão apresentados os resultados mais significativos obtidos para as frequências de falha na gaiola e pista interna.

Tabela 7 – Varredura no gráfico da Análise do Envelope – Frequências de Falha na Gaiola (FTF)

| Rotação (RPM) | Harmônico da Rotação mais Próximo (Hz) | FTF | | | | | |
|------------------|--|------------------------------|-------------------|-----------------------------|-----------------|-------------------|-------------------------------------|
| | | Harmônico da falha (#) | Calculado (Hz) | Banda Cent – Lat (Hz) | Gráfico (Hz) | Variação (<2%) | Gráfico (acel) (g2 pk- pk) |
| 788,00 | 340,60 | 71 | 348,79 | 1000 - 1000 | 346,15 | 0,76 | 0,044075 |
| | 340,60 | 71 | 348,79 | 7500 - 3000 | 346,12 | 0,76 | 0,082027 |
| | 694,30 | 141 | 692,66 | 7500 - 3000 | 691,84 | 0,12 | 0,033450 |
| | 1034,9 | 211 | 1036,54 | 7500 - 3000 | 1038,06 | -0,15 | 0,032746 |
| 1788,00 | 357,60 | 33 | 368,78 | 700 - 2000 | 367,10 | 0,60 | 0,046231 |
| | 715,20 | 66 | 737,55 | 7500 - 2000 | 733,09 | 0,60 | 0,040800 |
| | 1102,60 | 98 | 1095,15 | 7500 - 2000 | 1099,99 | -0,44 | 0,014000 |
| | 357,60 | 33 | 368,78 | 7500 - 2000 | 367,10 | 0,45 | 0,063000 |
| | 715,20 | 66 | 737,55 | 7500 - 2000 | 733,09 | 0,60 | 0,040800 |
| | 1102,60 | 98 | 1095,15 | 7500 - 2000 | 1099,99 | -0,44 | 0,014000 |
| 3600,00 | 300,00 | 14 | 315,00 | 500 - 1000 | 312,00 | 0,95 | 0,020877 |
| | 60,00 | 2 | 45,00 | 5600 - 2000 | 46,81 | -4,02 | 0,010000 |
| | 180,00 | 8 | 180,00 | 5600 - 2000 | 187,16 | -3,98 | 0,018000 |
| | 60,00 | 2 | 45,00 | 8300 - 3000 | 46,81 | -4,02 | 0,011000 |
| | 180,00 | 8 | 180,00 | 8301 - 3000 | 187,16 | -3,98 | 0,016000 |
| | 300,00 | | | | | 0,00 | |

Tabela 8 – Varredura no gráfico da Análise do Envelope – Frequências de Falha na Pista Interna (BPFI)

| Rotação (RPM) | Harmônico da Rotação mais Próximo (Hz) | BPFI | | | | | |
|---------------|--|------------------------|----------------|-----------------------|--------------|----------------|---------------------------|
| | | Harmônico da falha (#) | Calculado (Hz) | Banda Cent – Lat (Hz) | Gráfico (Hz) | Variação (<2%) | Gráfico (acel) (g2 pk-pk) |
| 788,00 | 340,60 | 5 | 327,63 | 1000 - 1000 | 346,15 | -5,65 | 0,044075 |
| | 340,60 | 5 | 327,63 | 7500 - 3000 | 346,12 | -5,64 | 0,082027 |
| | 694,30 | 10 | 655,26 | 7500 - 3000 | 691,84 | -5,58 | 0,033450 |
| | 1034,9 | 16 | 1048,42 | 7500 - 3000 | 1038,06 | 0,99 | 0,032746 |
| 1788,00 | 357,60 | | | | | | |
| | 625,00 | 4,00 | 596,24 | 700 - 2000 | 605,93 | -1,62 | 0,002414 |
| | 715,20 | 5 | 745,30 | 700 - 2000 | 733,09 | 1,64 | 0,026209 |
| | 1102,60 | 7 | 1043,42 | 700 - 2000 | 1099,79 | -5,40 | 0,007344 |
| | 1460,20 | 10 | 1490,60 | 700 - 2000 | 1466,09 | 1,64 | 0,002707 |
| | 715,20 | 5 | 745,30 | 7500 - 2000 | 733,09 | 1,64 | 0,040800 |
| | 1102,60 | 7 | 1043,42 | 7500 - 2000 | 1099,99 | -5,42 | 0,014000 |
| | 1460,20 | 10 | 1490,60 | 7500 - 2000 | 1464,11 | 1,78 | 0,005923 |
| | | 12 | 1788,72 | 7500 - 2000 | 1833,74 | -2,52 | 0,001591 |
| 3600,00 | 300,00 | 2 | 300,12 | 500 - 1000 | 312,00 | -3,96 | 0,018988 |
| | 600,00 | 3 | 600,24 | 500 - 1000 | 624,10 | -3,98 | 0,006666 |
| | 300,00 | 2 | 300,12 | 5600 - 2000 | 312,01 | -3,96 | 0,006613 |
| | 2700,00 | 9 | 2701,08 | 5600 - 2000 | 2799,87 | -3,66 | 0,002960 |
| | 2700,00 | 10 | 3001,20 | 5600 - 2000 | 2915,01 | 2,87 | 0,002106 |
| | 300,00 | 2 | 300,12 | 8300 - 3000 | 312,01 | -3,96 | 0,006613 |

Novamente, percebe-se um grande número de ocorrências para as falhas na gaiola (FTF) e na pista interna (BPFI). As justificativas e propostas de diagnóstico serão realizadas posteriormente.

6.1. Análise dos resultados:

A metodologia apresentada foi aplicada aos quatro mancais defeituosos. Portanto, na presente subitem serão apresentados os dados obtidos por meio desta aplicação. Em seguida, serão apresentadas considerações e propostas de diagnósticos para cada mancal.

a) Mancal 1:

No caso do mancal 1, os dados mais significativos obtidos com as varreduras estão apresentados nas Tabelas 7 e 8. A partir dessas, percebe-se que houve um grande número de ocorrências para FTF e BPFI. Nesse caso, torna-se difícil um diagnóstico preciso. Além disso, é possível notar um grande número de frequências coincidentes com harmônicos da rotação. Para 3600 RPM, nota-se que para as frequências relacionadas à BPFI, houve ocorrências, em amplitudes significativas, próximas às frequências características de falha calculadas teóricamente. Porém, todas essas apresentaram uma variação superior a 2%, de forma contrária ao ocorrido para as outras rotações. Isso pode sugerir a necessidade de um aumento na carga sobre o eixo a fim de reduzir o efeito de deslizamento dos elementos rolantes, o que pode estar desviando possíveis frequências de falha de seus valores reais.

Dessa forma, a análise do mancal 1 permitiu concentrar as maiores chances de presença de falhas na gaiola (FFT) ou na pista interna (BPFI). Com isso, novas rodadas variando-se a carga imposta sobre o eixo de rotação ou a implementação de um desbalanceamento como tentativa de maximizar a influência dos impactos provocados por essas falhas seria uma estratégia útil para confirmação e seleção de uma dessas falhas. No entanto, a aplicação da metodologia se mostrou útil para confirmar que há um defeito e limitar as possibilidades sobre a localização do mesmo.

Outro ponto a ser destacado é a grande ocorrência de falhas relacionadas a FTF. Isso pode ser justificado no fato dessa frequência apresentar um valor menor para o primeiro harmônico. Logo, é esperado que haja mais frequências coincidentes para essa falha.

No entanto, se considerarmos uma variação máxima de 4%, ao invés de 2% adotada pelas referências, a fim de ampliar a contribuição do deslizamento devido a pouca carga sobre o eixo, verifica-se que não houve uma superioridade significativa do número de frequências para FTF em relação a BPFI. Essa constatação difere do que foi observado para o mancal 2, por exemplo, onde foi observada uma predominância quase absoluta de frequências FTF. Essa evidência permite a proposição de um diagnóstico para o mancal 1 de **falha na pista interna**.

b) Mancal 2:

Abaixo são apresentados os gráficos e tabelas com valores mais significativos para as varreduras desenvolvidas com o processamento dos dados adquiridos nas simulações com o mancal 2, seguindo a metodologia proposta:

i. Geração do gráfico FFT:

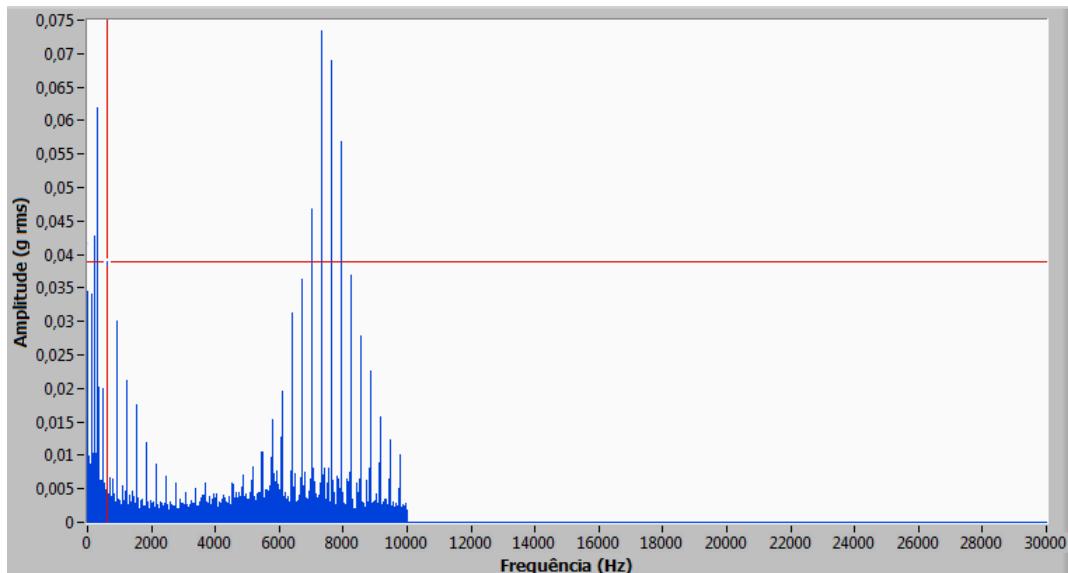


Figura 26 – Gráfico FFT para o mancal 2 a 800 RPM, limitado a 10 kHz.

ii. Varredura Preliminar no Gráfico FFT :

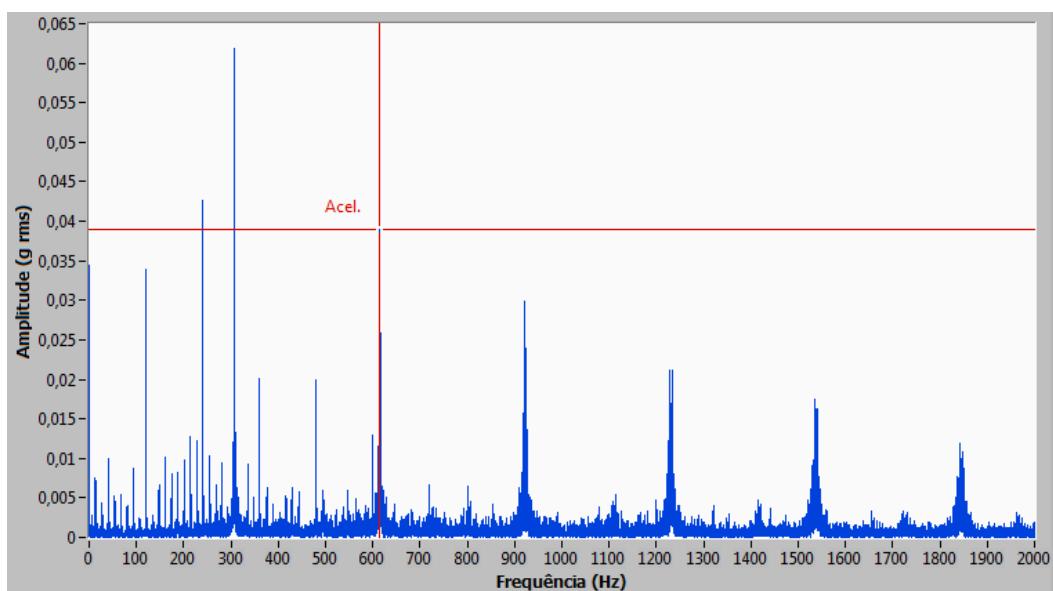


Figura 27 – Gráfico FFT limitado em 2 kHz, para o mancal 2 a 800 RPM

Tabela 9 – Varredura no gráfico FFT – Frequências de Falha na Gaiola (FTF) para o mancal 2

| Rotação (RPM) | Harmônico da Rotação mais Próximo (Hz) | FTF | | | | |
|---------------|--|------------------------|----------------|----------------|--------------|---------------------------|
| | | Harmônico da falha (#) | Calculado (Hz) | Variação (<2%) | Gráfico (Hz) | Gráfico (acel) (g2 pk-pk) |
| 788,00 | 235,80 | 49 | 240,7125 | -0,30 | 240,00 | 0,04 |
| | 301,30 | 63,00 | 304,58 | 0,86 | 307,20 | 0,06 |
| | 366,80 | 74,00 | 363,53 | -0,94 | 360,10 | 0,02 |
| | 615,70 | 125,00 | 614,06 | -0,03 | 613,90 | 0,04 |
| 1788,00 | 353,70 | 73 | 353,70 | -0,23 | 352,90 | 0,07 |
| | 476,80 | 43 | 480,53 | -0,11 | 480,00 | 0,02 |
| | 715,20 | 63 | 704,03 | 0,27 | 705,90 | 0,04 |
| 3600,00 | 300,00 | 14 | 315,00 | 1,59 | 320,00 | 0,04 |
| | 360,00 | 15 | 337,50 | -0,74 | 335,00 | 0,01 |
| | 660,00 | 28 | 630,00 | 1,41 | 638,90 | 0,03 |

Tabela 10 – Varredura no gráfico FFT – Frequências de Falha na Pista Externa (BPFO), para o mancal 2.

| Rotação (RPM) | Harmônico da Rotação mais Próximo (Hz) | BPFO | | | | |
|---------------|--|------------------------|----------------|----------------|--------------|---------------------------|
| | | Harmônico da falha (#) | Calculado (Hz) | Variação (<2%) | Gráfico (Hz) | Gráfico (acel) (g2 pk-pk) |
| 788,00 | 235,80 | 6 | 235,6428 | 1,85 | 240,00 | 0,04 |
| | 301,30 | 8 | 314,19 | 0,86 | 307,20 | 0,06 |
| | 366,80 | 9 | 353,46 | 1,88 | 360,10 | 0,02 |
| | 615,70 | 16 | 628,38 | -2,30 | 613,90 | 0,04 |
| 1788,00 | 353,70 | 4 | 357,36 | -1,25 | 352,90 | 0,07 |
| | 715,20 | 8 | 714,72 | -1,23 | 705,90 | 0,04 |
| 3600,00 | 300,00 | | | | | |
| | 360,00 | | | | | |
| | 660,00 | | | | | |

A observação nas tabelas acima permite constatar uma predominância da falha na gaiola, já que essa apresenta um maior número de amplitudes significativas. Além disso, ao contrário do ocorrido para o mancal 1, as frequências características de falhas apresentaram um maior distanciamento em relação aos harmônicos da frequência de rotação. Entretanto, o número de ocorrências obtido para a frequência de falha na pista externa, bem como as amplitudes associadas, também foi significativo e, portanto, não pode ser descartada a possibilidade de existência da mesma. Isso justifica a demanda pela continuidade da aplicação da metodologia proposta.

iii. Seleção das Bandas de Frequências :

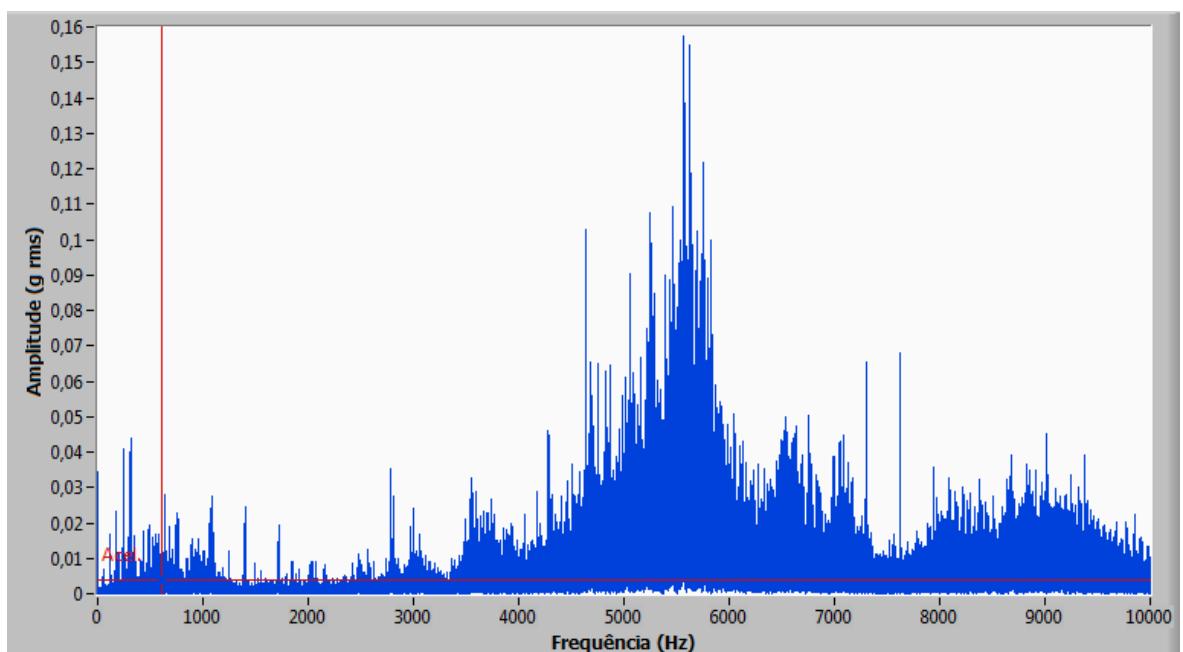


Figura 27 – Gráfico FFT do qual foram retiradas as bandas para análise do mancal 2, a 3600 RPM

Tabela 11 – Valores para as Bandas Central e Lateral obtidas para o mancal 2 a 3600 RPM.

| | Banda Central (Hz) | Banda lateral (Hz) |
|---|--------------------|--------------------|
| 1 | 600 | 1200 |
| 2 | 5500 | 3000 |
| 3 | 9000 | 2000 |

As demais bandas estão sintetizadas nas tabelas de frequências, no tópico a seguir.

iv. Geração do Gráfico do Envelope :

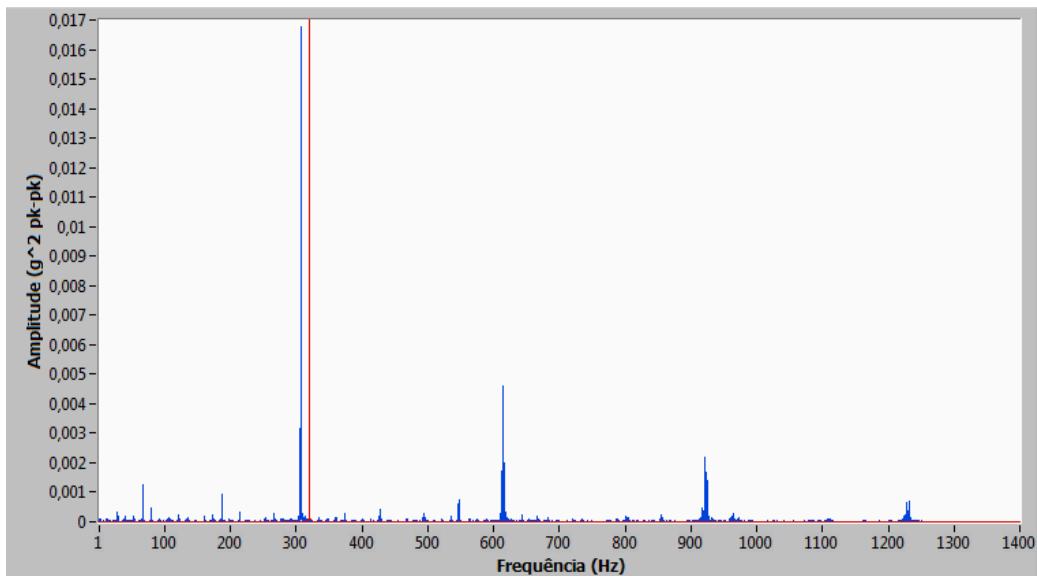


Figura 28 – Gráfico gerado a partir da Análise do Envelope para o mancal 2 a 800 RPM em uma banda central de 600 e lateral de 1200.

v. Tabela de Frequências:

Tabela 12 – Varredura no gráfico da Análise do Envelope – Frequências de Falha na Gaiola (FTF) para o mancal 2.

| Rotação (RPM) | Harmônico da Rotação mais Próximo (Hz) | FTF | | | | | |
|---------------|--|------------------------|----------------|-----------------------|--------------|----------------|---------------------------|
| | | Harmônico da falha (#) | Calculado (Hz) | Banda Cent – Lat (Hz) | Gráfico (Hz) | Variação (<2%) | Gráfico (acel) (g2 pk-pk) |
| 788,00 | - | | | | | | |
| | 301,3 | 23 | 304,575 | 600-1200 | 307,13 | -0,84 | 0,016780 |
| | 301,3 | 23 | 304,575 | 7500 - 3000 | 307,21 | -0,86 | 0,061303 |
| 1788,00 | 615,7 | 124 | 609,15 | 7501 - 3000 | 613,91 | -0,78 | 0,008625 |
| | 357,60 | 32 | 357,60 | 1100 - 2000 | 352,890561 | 1,32 | 0,01948 |
| | 357,60 | 32 | 357,60 | 5800 - 1300 | 352,92 | 1,31 | 0,003010 |
| 3600,00 | 357,60 | 32 | 357,60 | 7500 - 2000 | 352,89 | 1,32 | 0,008883 |
| | 300,00 | 14 | 315 | 600 - 1200 | 319,99 | -1,58 | 0,0122251 |
| | 180,00 | 8 | 180,00 | 5500 - 3000 | 185,76 | -3,20 | 0,024623 |
| | 360,00 | 33 | 368,78 | 5501 - 3000 | 370,93 | -0,58 | 0,029537 |
| | 420,00 | 18 | 405,00 | 9000 - 2000 | 410,82 | -1,44 | 0,003305 |
| | | | | | | | 0,00 |

Tabela 13 – Varredura no gráfico da Análise do Envelope – Frequências de Falha na Pista Externa (BPF0) para o mancal 2.

| Rotação (RPM) | Harmônico da Rotação mais Próximo (Hz) | BPFO | | | | | |
|------------------|---|------------------------------|-------------------|-----------------------------|-----------------|-------------------|------------------------------|
| | | Harmônico da falha (#) | Calculado (Hz) | Banda Cent – Lat (Hz) | Gráfico (Hz) | Variação (<2%) | Gráfico (acel) (g2 pk-pk) |
| - | - | 301,3 | 8 | 314,19 | 7500 - 3000 | 307,21 | 2,22 |
| | | 357,60 | 4 | 357,36 | 1100 - 2000 | 352,8906 | 1,25 |
| | | 357,60 | 4 | 357,36 | 5800- 1300 | 352,92 | 1,24 |
| | | 357,60 | 4 | 357,36 | 7500 - 2000 | 352,89 | 1,25 |
| | 300,00 | | | | | 0,00 | |
| | 180,00 | | | | | 0,00 | |
| | 360,00 | | | | | 0,00 | |
| | 420,00 | | | | | 0,00 | |
| | | | | | | 0,00 | |

Em relação a análise do sinal do envelope para ao mancal 2 nas três rotações, observa-se uma superioridade considerável no número de ocorrências de frequências características da falha na gaiola (FTF). Adicionalmente, não foi observada uma ocorrência para a frequência característica da falha da pista externa que suficientemente significativa a ponto de influenciar no diagnóstico final. Com isso, pode-se constatar que existem grandes chances do mancal 2 apresentar uma falha na gaiola. Entretanto, foi observado que algumas das ocorrências citadas se aproximam dos harmônicos da rotação. Logo, para proporcionar um nível maior de confiabilidade, é indicada a realização de um experimento variando-se a carga sobre o eixo, visando afastar os harmônicos da rotação das frequências características de falha predominantes no sinal.

No caso do mancal 2, percebe-se que os harmônicos da rotação coincidem com as frequências de falhas mais relevantes. Isso torna a identificação da falha menos confiável. No entanto, a ocorrência de FTFs coincidentes foi superior. Além disso, apesar de algumas ocorrências de BPFOs, essas tiveram uma variação superior a 2. Apesar de persistir a preocupação a respeito da influência do deslizamento no limite máximo adotado para a variação entre os valores, nesse caso não foi verificado um número de harmônicos de BPFO

que estimulasse dúvidas quanto sua ocorrência. Logo, conclui-se que há grandes chances de se tratar de uma **falla na gaiola**.

c) Mancal 3 :

i. Geração do gráfico FFT :

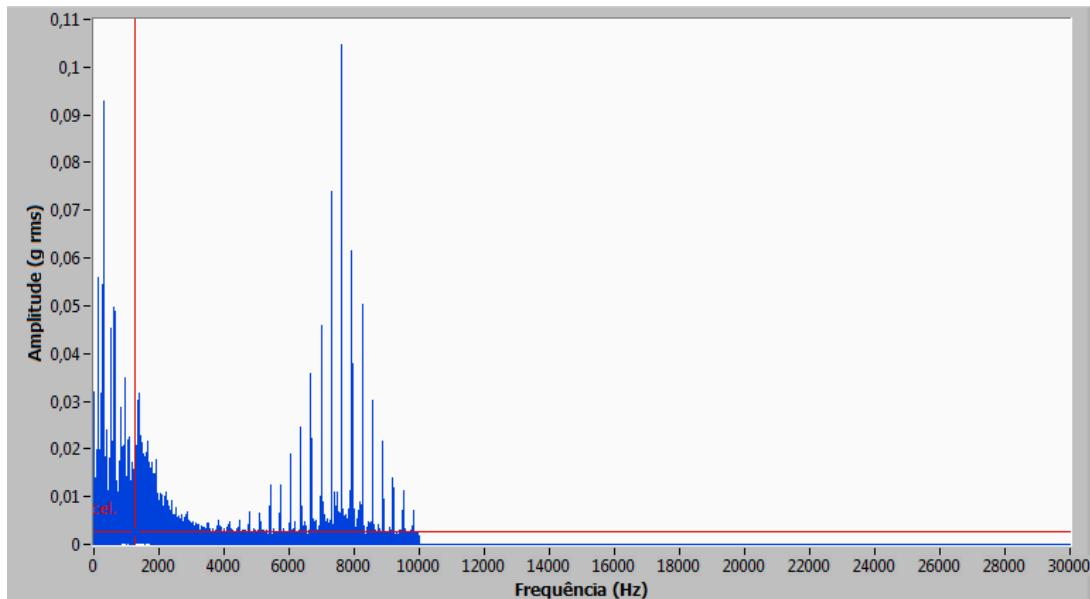


Figura 29 – Gráfico FFT para o mancal 3 a 800 RPM, limitado a 10 kHz.

ii. Varredura Preliminar no Gráfico FFT

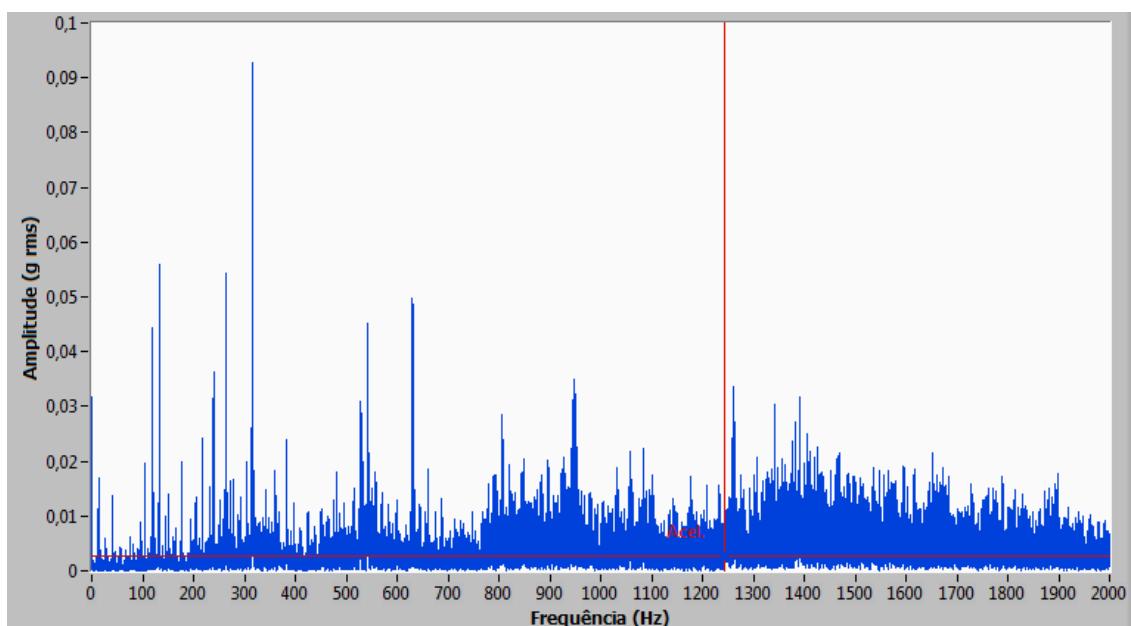


Figura 30 – Gráfico FFT limitado em 2 kHz, para o mancal 3 a 800 RPM

Tabela 14 – Varredura no gráfico FFT – Frequências de Falha na Gaiola (FTF), para o mancal 3.

| Rotação (RPM) | Harmônico da Rotação mais Próximo (Hz) | FTF | | | | |
|------------------|--|------------------------------|-------------------|--|-----------------|------------------------------|
| | | Harmônico da falha (#) | Calculado (Hz) | Variação <th>Gráfico (Hz)</th> <th>Gráfico (acel) (g2 pk-pk)</th> | Gráfico (Hz) | Gráfico (acel) (g2 pk-pk) |
| 788,00 | 314,40 | 64 | 314,40 | 0,22 | 315,10 | 0,092800 |
| 1788,00 | 536,40 | 49 | 547,58 | 0,39 | 549,70 | 0,007541 |
| | 625,80 | 55 | 614,63 | -0,75 | 610,00 | 0,135490 |
| | 834,40 | 75 | 838,13 | 0,35 | 841,10 | 0,156500 |
| 3600,00 | 1020,00 | 45 | 1012,50 | -0,84 | 1004,00 | 0,251700 |
| | 1140,00 | 50 | 1125,00 | -0,10 | 1123,90 | 0,446110 |
| | 1260,00 | 55 | 1237,50 | 0,45 | 1243,10 | 0,276150 |

Tabela 15 – Varredura no gráfico FFT – Frequências de Falha nos Elementos Rolantes (BSF), para o mancal 3.

| Rotação (RPM) | Harmônico da Rotação mais Próximo (Hz) | BSF | | | | |
|------------------|--|-------------------------------|-------------------|--|-----------------|------------------------------|
| | | Harmônico da falha (Hz) | Calculado (Hz) | Variação <th>Gráfico (Hz)</th> <th>Gráfico (acel) (g2 pk-pk)</th> | Gráfico (Hz) | Gráfico (acel) (g2 pk-pk) |
| 788,00 | 314,40 | 13 | 318,63 | -1,11 | 315,10 | 0,092800 |
| 1788,00 | 536,40 | 10 | 557,56 | -1,41 | 549,70 | 0,007541 |
| | 625,80 | 11 | 613,31 | -0,54 | 610,00 | 0,135490 |
| | 834,40 | 15 | 836,34 | 0,57 | 841,10 | 0,156500 |
| 3600,00 | 1020,00 | 9 | 1010,34 | -0,63 | 1004,00 | 0,251700 |

| | | | | | | |
|--|---------|----|---------|-------------|---------|-----------------|
| | 1140,00 | 10 | 1122,60 | 0,12 | 1123,90 | 0,446110 |
| | 1260,00 | 11 | 1234,86 | 0,67 | 1243,10 | 0,276150 |

Para o mancal 3 são apresentados os dados mais significativos referentes as frequências de falha que predominaram na varredura preliminar: a falha na gaiola (FTF) e a falha nos elementos rolantes (BSF). Percebe-se que houve um número relativamente alto de ocorrência para os dois casos. Logo, faz-se necessário continuar a aplicação da metodologia proposta visando a obtenção de mais informações. Porém, vale ressaltar que os harmônicos para BSF se apresentaram de forma quase sequencial, o que pode vir a ser um idício de maior influência desse tipo de falha.

iii. Seleção das Bandas de Frequências:

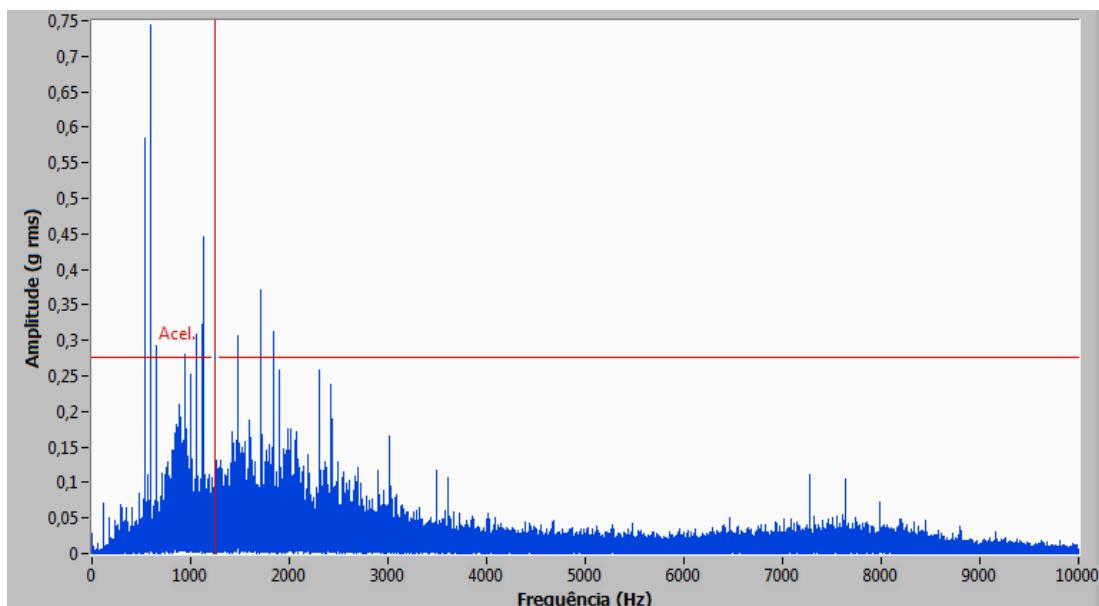


Figura 31 – Gráfico FFT do qual foram retiradas as bandas para análise do mancal 3, a 3600 RPM

Tabela 16 – Valores para as Bandas Central e Lateral obtidas para o mancal 3 a 3600 RPM.

| | Banda Central (Hz) | Banda lateral (Hz) |
|---|-------------------------------|-------------------------------|
| 1 | 1000 | 2000 |

| | | |
|---|------|------|
| 3 | 7500 | 2000 |
|---|------|------|

As demais bandas estão sintetizadas nas tabelas de frequências, no tópico a seguir.

iv. Geração do Gráfico do Envelope:

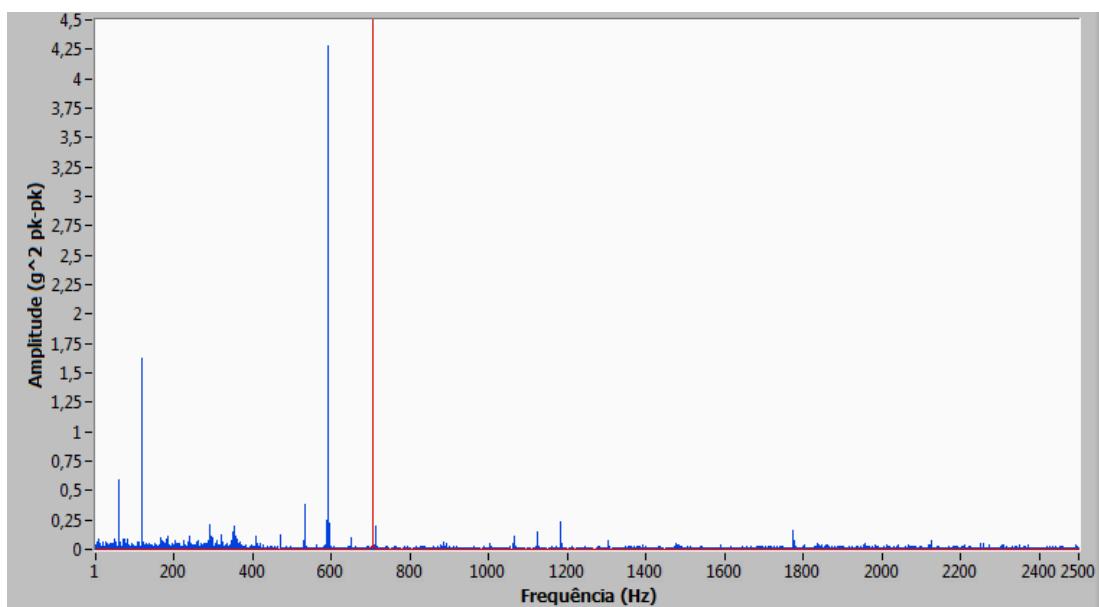


Figura 32 – Gráfico gerado a partir da Análise do Envelope para o mancal 3 a 800 RPM
em uma banda central de 1000 e lateral 2000.

v. Tabela de Frequências:

Tabela 17 – Varredura no gráfico Análise do Envelope – Frequências de Falha na Gaiola (FTF) para o mancal 3.

| Rotação | Harmônico da Rotação | FTF | | | | | | |
|---------|----------------------|--------------------|-----------|--------|--------------|----------------|----------------|----------|
| | | Harmônico da falha | Calculado | Banda | Gráfico (Hz) | Variação (<2%) | Gráfico (acel) | |
| 788,00 | - | 314,40 | 64 | 314,40 | 1000 - 2000 | 315,07 | -0,21 | 0,020114 |
| | - | 314,40 | 64 | 314,40 | 7500 - 2000 | 315,07 | -0,21 | 0,063613 |
| | - | 628,80 | 128 | 628,80 | 7501 - 2000 | 630,14 | -0,21 | 0,021303 |
| 1788,00 | - | 178,80 | 15 | 167,63 | 1500 - 1500 | 169,85 | -1,33 | 0,066211 |
| | - | 596,00 | 55 | 614,63 | 1500 - 1500 | 610,05 | 0,74 | 0,270710 |

| | | | | | | | |
|--|---------|----|---------|-------------|---------|-------|----------|
| | 327,00 | 28 | 312,90 | 7500 - 3000 | 319,81 | -2,21 | 0,016870 |
| | 387,40 | 33 | 379,95 | 7500 - 3000 | 374,93 | 1,32 | 0,017035 |
| | 566,20 | 50 | 558,75 | 7500 - 3000 | 550,99 | 1,39 | 0,001095 |
| | 596,00 | 55 | 614,625 | 7500 - 3000 | 610,01 | 0,75 | 0,006801 |
| | | | | | | | |
| | 120,00 | 5 | 112,50 | 1800 - 2000 | 119,86 | -6,55 | 1,207700 |
| | 1080,00 | 47 | 1057,50 | 1800 - 2000 | 1063,87 | -0,60 | 0,103050 |
| | 1140,00 | 52 | 1170,00 | 1800 - 2000 | 1183,84 | -1,18 | 0,324220 |
| | 1200,00 | 55 | 1237,50 | 1800 - 2000 | 1242,97 | -0,44 | 0,042943 |
| | 1620,00 | 74 | 1642,50 | 1800 - 2000 | 1655,09 | -0,77 | 0,031299 |
| | 120,00 | 5 | 112,5 | 7600 - 2000 | 119,86 | -6,55 | 0,127670 |
| | | | | | | | 0,00 |

Tabela 18 – Varredura no gráfico Análise do Envelope – Frequências de Falha nos elementos rolantes (BSF) para o mancal 3.

| Rotação (RPM) | Harmônico da Rotação (Hz) | BSF | | | | | | |
|------------------|---------------------------------|------------------------------|-------------------|------------------------------|-----------------|-------------------|------------------------------|-----------|
| | | Harmônico da falha (#) | Calculado (Hz) | Bandas Cent - Lat (Hz) | Gráfico (Hz) | Variação (<2%) | Gráfico (acel) (g2 pk-pk) | |
| - | - | 314,40 | 13 | 318,63 | 1000 - 2000 | 315,07 | 1,12 | 0,020114 |
| | | 314,40 | 13 | 318,63 | 7500 - 2000 | 315,07 | 1,12 | 0,063613 |
| | | 628,80 | 26 | 637,26 | 7500 - 2000 | 630,14 | 1,12 | 0,0213030 |
| | | | | | | | | |
| | | 149,00 | 3 | 167,27 | 1500 - 1500 | 169,85 | -1,55 | 0,066211 |
| | | 596,00 | 11 | 613,31 | 1500 - 1500 | 610,05 | 0,53 | 0,270710 |
| | | 566,20 | 10 | 557,56 | 7500 - 3000 | 550,99 | 1,18 | 0,001095 |
| | | 596,00 | 11 | 613,31 | 7500 - 3000 | 610,01 | 0,54 | 0,006801 |
| | | 1132,40 | 20 | 1115,12 | 7500 - 3000 | 1125,79 | -0,96 | 0,007852 |
| | | 1519,80 | 27 | 1505,40 | 7500 - 3000 | 1500,82028 | 0,30 | 0,003124 |
| | | | | | | | | |
| | | 120,00 | 1 | 112,26 | 1800 - 2000 | 119,86 | -6,77 | 1,207700 |
| | | 1020,00 | 9 | 1010,34 | 1800 - 2000 | 1003,94 | 0,63 | 0,079243 |
| | | 1140,00 | 10 | 1122,60 | 1800 - 2000 | 1123,01 | -0,04 | 0,219250 |
| | | 1200,00 | 11 | 1234,86 | 1800 - 2000 | 1242,97 | -0,66 | 0,042943 |
| | | 1320,00 | 12 | 1347,12 | 1800 - 2000 | 1303,20373 | 3,26 | 0,075346 |
| | | 1320,00 | 12 | 1347,12 | 1800 - 2000 | 1383,95 | -2,73 | 0,047134 |
| | | 1620,00 | 15 | 1683,90 | 1800 - 2000 | 1655,09 | 1,71 | 0,031299 |
| | | 120,00 | 1 | 112,26 | 7600 - 2000 | 119,86 | -6,77 | 0,127670 |
| | | | | | | | 0,00 | |

Para o mancal 3, tanto para a varredura preliminar do FFT quanto para a varredura do gráfico do envelope, foi verificado um grande número de ocorrências de frequências características das falhas FTF e BSF. Novamente, percebe-se um número expressivo de frequências próximas aos harmônicos da frequência de rotação do eixo. Conforme dito anteriormente, essas características são um fator complicador para a realização de um diagnóstico seguro.

Um ponto a ser destacado na presente rodada corresponde as sequências de harmônicos observados para FTF e BSF. No primeiro caso, observou-se que as frequências mais significativas correspondem a harmônicos elevados, os quais aparecem bem espaçados entre si. No segundo caso, entretanto, as ocorrências corresponderam a hamônicos mais baixos de forma quase sequencial, tanto para a varredura preliminar quanto para a varredura do gráfico do envelope. Isso pode ser um indicativo da predominância da falha BSF no referido mancal.

Com isso, percebe-se que foi possível obter em, um primeiro momento, uma redução das possibilidades de falhas presentes no mancal 3. Em seguida, foi possível propor um diagnóstico relativamente criterioso. No entanto, os pontos ressaltados no primeiro parágrafo da presente consideração revelam um indicativo da necessidade de novas rodadas a fim de afastar as frequências características dos harmônicos da rotação e reduzir as variações obtidas devido ao efeito de deslizamento.

d) Mancal 4:

i. Geração do gráfico FFT :

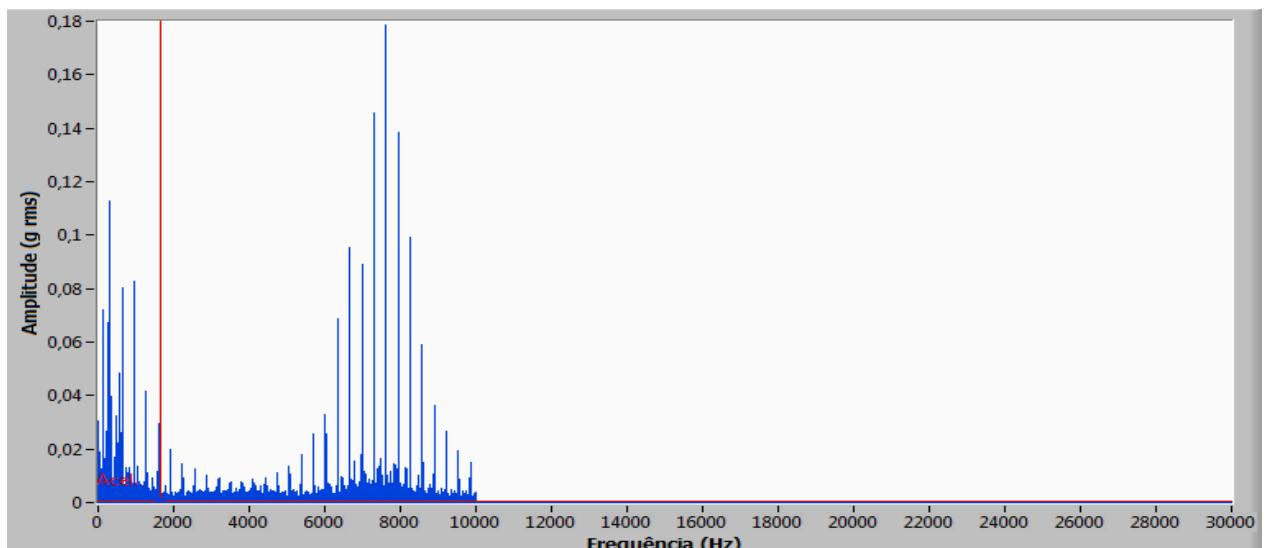


Figura 33 – Gráfico FFT para o mancal 4 a 800 RPM, limitado a 10 kHz

ii. Varredura Preliminar no Gráfico FFT :

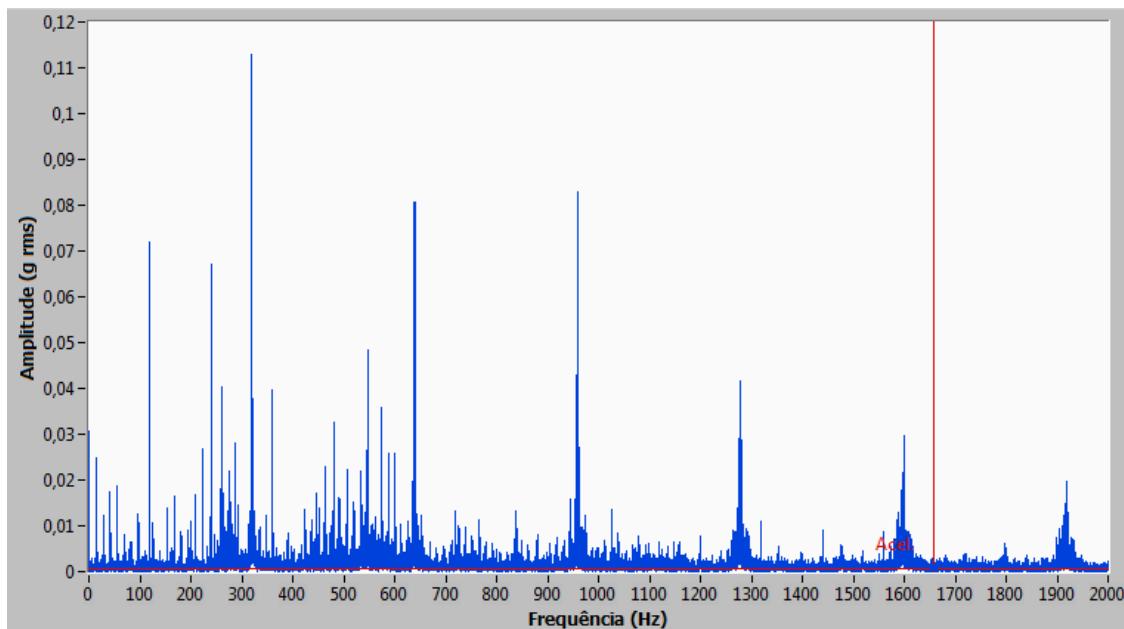


Figura 34 – Gráfico FFT limitado em 2 kHz, para o mancal 4 a 800 RPM

Tabela 19 – Varredura no gráfico FFT – Frequências de Falha na Gaiola (FTF), para o mancal 4.

| Rotação (RPM) | Harmônico da Rotação mais Próximo (Hz) | FTF | | | | |
|------------------|---|------------------------------|-------------------|---------|-------------------|------------------------------|
| | | Harmônico da falha (#) | Calculado (Hz) | Gráfico | Variação (<2%) | Gráfico (acel) (g2 pk-pk) |
| 788,00 | 117,9 | 24 | 117,90 | 120,00 | -1,78 | 0,072037 |
| | 248,90 | 49 | 240,71 | 240,00 | 0,30 | 0,067142 |
| | 314,40 | 65 | 319,31 | 319,80 | -0,15 | 0,1067 |
| | 537,10 | 11 | 545,29 | 547,90 | -0,48 | 0,04841 |
| | 628,80 | 129 | 638,63 | 638,90 | -0,04 | 0,0805 |
| 1788,00 | 357,60 | 32 | 357,60 | 355,10 | 0,70 | 0,11 |
| | 536,40 | 49 | 547,58 | 548,10 | -0,10 | 0,12 |
| | 715,20 | 64 | 715,20 | 712,00 | 0,45 | 0,06 |
| 3600,00 | 1140,00 | 50 | 1125,00 | 1122,00 | 0,05 | 1,54 |
| | 1680,00 | 74 | 1665,00 | 1658,20 | 0,41 | 0,10 |

Tabela 20 – Varredura no gráfico FFT – Frequências de Falha nos Elementos Rolantes (BSF), para o mancal 4.

| Rotação (RPM) | Harmônico da Rotação mais Próximo (Hz) | BSF | | | | |
|---------------|--|------------------------|----------------|--------------|----------------|---------------------------|
| | | Harmônico da falha (#) | Calculado (Hz) | Gráfico (Hz) | Variação (<2%) | Gráfico (acel) (g2 pk-pk) |
| 788,00 | 248,90 | 10 | 245,10 | 240,00 | 2,08 | 0,067142 |
| | 314,40 | 13 | 318,63 | 319,80 | -0,37 | 0,1067 |
| | 537,10 | 22 | 539,22 | 547,90 | -1,61 | 0,04841 |
| | 628,80 | 26 | 637,26 | 638,90 | -0,26 | 0,0805 |
| 1788,00 | 357,60 | 6 | 334,53 | 355,10 | -6,15 | 0,11 |
| | 536,40 | 10 | 557,56 | 548,10 | 1,70 | 0,12 |
| | 715,20 | 13 | 724,83 | 712,00 | 1,77 | 0,06 |
| 3600,00 | 1140,00 | 10 | 1122,60 | 1122,00 | 0,05 | 1,54 |
| | 1680,00 | 15 | 1683,90 | 1658,20 | 1,53 | 0,10 |

Tabela 21 – Varredura no gráfico FFT – Frequências de Falha Pista Externa (BPFO), para o mancal 4.

| Rotação (RPM) | Harmônico da Rotação mais Próximo (Hz) | BPFO | | | | |
|---------------|--|------------------------|----------------|---------------|----------------|---------------------------|
| | | Harmônico da falha (#) | Calculado (Hz) | Gráfico (Hz) | Variação (<2%) | Gráfico (acel) (g2 pk-pk) |
| 788,00 | 117,9 | 3 | 117,82 | 120,00 | -1,85 | 0,072037 |
| | 248,90 | 6 | 235,64 | 240,00 | -1,85 | 0,067142 |
| | 314,40 | 8 | 314,19 | 319,80 | -1,79 | 0,1067 |
| | 537,10 | 14 | 549,83 | 547,90 | 0,35 | 0,04841 |
| | 628,80 | 16 | 628,38 | 638,90 | -1,67 | 0,0805 |
| 1788,00 | 357,60 | 4 | 357,36 | 355,10 | 0,63 | 0,11 |
| | 536,40 | 6 | 536,04 | 548,10 | -2,25 | 0,12 |
| | 715,20 | 8 | 714,72 | 712,00 | 0,38 | 0,06 |
| 3600,00 | 1140,00 | 6 | 1079,28 | 1122,00 | -3,96 | 1,54 |
| | 1680,00 | 9 | 1618,92 | 1658,20 | -2,43 | 0,10 |

Para o mancal 4, foi verificado um grande número de ocorrências para as falhas na gaiola, elemento rolante e pista externa. Uma avaliação superficial das tabelas poderia sugerir que a falha na gaiola predomina no espectro. No entanto, essa falha foi observada para harmônicos muito distantes e elevados, o que incorpora certas imprecisões no cálculo dos mesmos. Logo, a varredura preliminar foi útil para restringir o foco da varredura seguinte, porém se mostrou não conclusiva.

iii. Seleção das Bandas de Frequências:

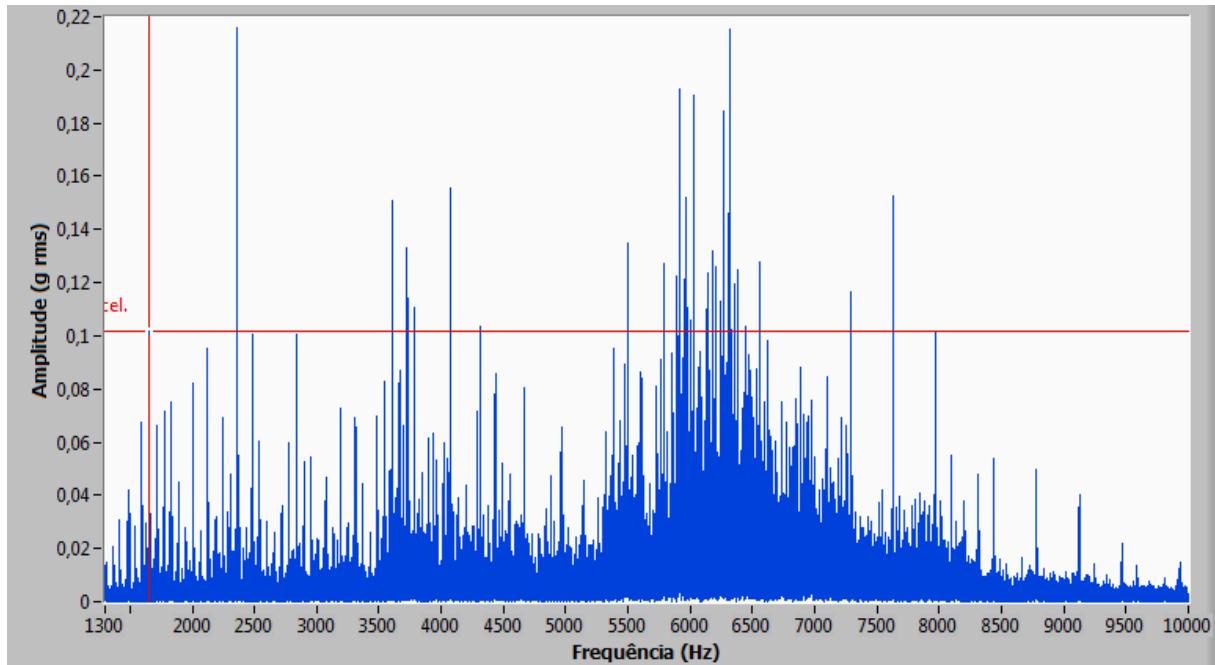


Figura 35 – Gráfico FFT do qual foram retiradas as bandas para análise do mancal 4, a 3600 RPM

Tabela 22 – Valores para as Bandas Central e Lateral obtidas para o mancal 4 a 3600 RPM.

| | Banda Central (Hz) | Banda lateral (Hz) |
|---|-------------------------------|-------------------------------|
| 1 | 2500 | 2000 |
| 3 | 6000 | 3000 |

iv. Geração do Gráfico do Envelope :

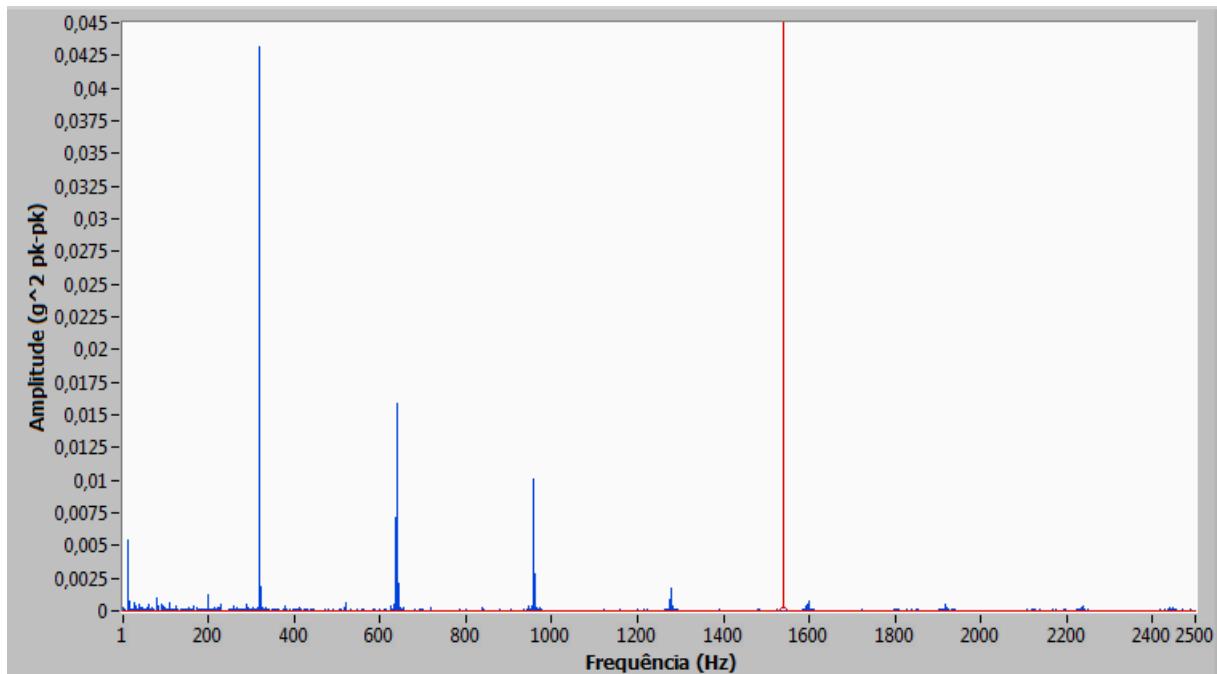


Figura 36 – Gráfico gerado a partir da Análise do Envelope para o mancal 3 a 800 RPM em uma banda central de 2500 e lateral 2000.

v. Tabela de Frequências :

Tabela 23 – Varredura no gráfico Análise do Envelope – Frequências de Falha na Gaiola (FTF) para o mancal 4.

| Rotação (RPM) | Harmônico da Rotação (Hz) | FTF | | | | | |
|---------------|---------------------------|------------------------|----------------|------------------------|--------------|----------------|---------------------------|
| | | Harmônico da falha (#) | Calculado (Hz) | Bandas Cent – Lat (Hz) | Gráfico (Hz) | Variação (<2%) | Gráfico (acel) (g2 pk-pk) |
| 788,00 | 327,50 | 66 | 324,23 | 1000 - 1000 | 320,011748 | 1,30 | 0,027102 |
| | | 130 | 638,63 | 1000 - 1000 | 639,823239 | -0,19 | 0,010724 |
| | 327,50 | 66 | 324,23 | 7500 - 2000 | 320,07 | 1,28 | 0,085821 |
| | 641,9 | 130 | 638,63 | 7500 - 2000 | 639,85 | -0,19 | 0,046313 |
| | 956,3 | 196 | 957,94 | 7500 - 2000 | 958,92 | -0,10 | 0,042094 |
| 1788,00 | 357,60 | 32 | 357,60 | 1000 - 1000 | 355,06 | 0,71 | 0,009882 |
| | 119,20 | 10 | 111,75 | 3750 - 1000 | 115,15 | -3,04 | 0,006750 |
| | 119,20 | 10 | 111,75 | 7500 - 3000 | 115,14 | -3,03 | 0,010354 |
| | 357,60 | 32 | 357,60 | 7500 - 3000 | 355,123109 | 0,69 | 0,056577 |
| | | | | | | | |
| 3600,00 | 540,00 | 24 | 540,00 | 2500 - 2000 | 530,99 | 1,67 | 0,138550 |
| | 2100,00 | 107 | 2407,50 | 2500 - 2000 | 2044,00 | 15,10 | 0,063146 |
| | 180,00 | 8 | 180,00 | 6000 - 3000 | 180,16 | -0,09 | 0,169900 |
| | 540,00 | 24 | 540 | 6000 - 3000 | 530,98 | 1,67 | 0,447460 |
| | 660,00 | 29 | 652,50 | 6000 - 3000 | 651,13 | 0,21 | 0,347950 |
| | | | | | | 0,00 | |

Tabela 24 – Varredura no gráfico Análise do Envelope – Frequências de Falha nos elementos rolantes (BSF) para o mancal 4.

| Rotação (RPM) | Harmônico da Rotação (Hz) | BSF | | | | | |
|---------------|---------------------------|------------------------|----------------|------------------------|--------------|----------------|---------------------------|
| | | Harmônico da falha (#) | Calculado (Hz) | Bandas Cent – Lat (Hz) | Gráfico (Hz) | Variação (<2%) | Gráfico (acel) (g2 pk-pk) |
| 788,00 | 327,50 | 13 | 318,63 | 1000 - 1000 | 320,01175 | -0,43 | 0,027102 |
| | | 26 | 637,26 | 1000 - 1000 | 639,82324 | -0,40 | 0,010724 |
| | | 26 | 637,26 | 7500 - 2000 | 639,85 | -0,41 | 0,046313 |
| | | 39 | 955,89 | 7500 - 2000 | 958,92 | -0,32 | 0,042094 |
| 1788,00 | 357,60 | 6 | 334,53 | 1000 - 1000 | 355,06 | -6,13 | 0,009882 |
| | 119,20 | 2 | 111,51 | 3750 - 1000 | 115,15 | -3,26 | 0,006750 |
| | 119,20 | 2 | 111,51 | 7500 - 3000 | 115,14 | -3,25 | 0,010354 |
| | 357,60 | 6 | 334,53 | 7500 - 3000 | 355,12 | -6,15 | 0,056577 |
| 3600,00 | 540,00 | 5 | 561,30 | 2500 - 2000 | 530,99 | 5,40 | 0,138550 |

| | | | | | | | |
|--|---------|----|---------|-------------|---------|-------|----------|
| | 2040,00 | 18 | 2020,68 | 2500 - 2000 | 2044,00 | -1,15 | 0,063146 |
| | 2400,00 | 22 | 2469,72 | 2500 - 2000 | 2484,74 | -0,61 | 0,049143 |
| | 540,00 | 5 | 561,30 | 6000 - 3000 | 530,98 | 5,40 | 0,447460 |

Tabela 25 – Varredura no gráfico Análise do Envelope – Frequências de Falha na Pista Externa (BPFO) para o mancal 4.

| Rotação (RPM) | Harmônico da Rotação (Hz) | BPFO | | | | | |
|------------------|---------------------------------|------------------------------|-------------------|------------------------------|--------------|-------------------|---------------------------------|
| | | Harmônico da falha (#) | Calculado (Hz) | Bandas Cent – Lat (Hz) | Gráfico (Hz) | Variação (<2%) | Gráfico (acel) (g2 pk-pk) |
| 788,00 | - | | | | | | |
| | 327,50 | 8 | 314,19 | 1000 - 1000 | 320,011748 | -1,85 | 0,027102 |
| | 327,50 | 13 | 318,63 | 7500 - 2000 | 320,07 | -0,45 | 0,085821 |
| 1788,00 | 956,3 | 24 | 942,57 | 7500 - 2000 | 958,92 | -1,73 | 0,042094 |
| | 357,60 | 4 | 357,36 | 1000 - 1000 | 355,06 | 0,64 | 0,009882 |
| | 357,60 | 4 | 357,36 | 7500 - 3000 | 355,12 | 0,63 | 0,056577 |
| 3600,00 | 540,00 | 3 | 539,64 | 2500 - 2000 | 530,99 | 1,60 | 0,138550 |
| | 1200,00 | 7 | 1259,16 | 2500 - 2000 | 1242,07 | 1,36 | 0,057856 |
| | 2100,00 | 13 | 2338,44 | 2500 - 2000 | 2400,00 | -2,63 | 0,000064 |
| | 2400,00 | 14 | 2518,32 | 2500 - 2000 | 2484,74 | 1,33 | 0,049143 |
| | 180,00 | 1 | 179,88 | 6000 - 3000 | 180,16 | -0,16 | 0,169900 |
| | 540,00 | 3 | 539,64 | 6000 - 3000 | 530,98 | 1,60 | 0,447460 |
| | 660,00 | 4 | 673,56 | 6000 - 3000 | 651,13 | 3,33 | 0,347950 |
| | | | | | | 0,00 | |

Seguindo a tendência apresentada na varredura preliminar dos gráficos FFT para o mancal 4 nas três rotações, onde ficou identificada a predominância de falhas do tipo FTF, BSF e BPFO, foi realizada uma nova varredura nos gráficos da Análise do Envelope. Como resultado, foi obtido um grande número de harmônicos de frequências características a essas falhas. Nas três tabelas correspondentes, pode-se observar a presença de amplitudes significativas, o que inviabiliza o descarte de uma delas baseando-se somente na magnitude desses valores.

Entretanto, de maneira análoga ao observado para o mancal 3, observa-se que a distribuição dos harmônicos para a falha na pista externa apresenta uma distribuição mais sequencial, com harmônicos menores e mais próximos em relação às demais falhas. Quanto

menor o harmônico da frequência característica de falha, menos incertezas de cálculo serão incorporadas em seu cálculo, tornando-o mais preciso. Com isso, para essa falha, além de estarem dispostos de forma sequencial, a obtenção de harmônicos menores sugere uma influência dessa falha em todo o espectro de forma mais precisa.

Outro ponto a ser destacado se refere a variação entre as frequências observadas e calculadas. Por meio das tabelas é possível notar que houve pontos nos quais essa variação foi superior ao limite de 2% proposto pelas referências. Logo, novamente faz-se a indicação por uma nova rodada de análises variando-se a carga através de pesos ou introdução de desbalanceamentos no eixo. Foram observadas também algumas ocorrências muito próximas aos harmônicos da frequência de rotação ddo eixo, o que influencia negativamente na formulação do diagnóstico.

Em síntese, um diagnóstico mais provável para o presente mancal corresponde à falha na pista externa (BPFO).

7. Conclusão e Recomendação

A pesquisa realizada para confecção do presente trabalho apontou que manutenção preventiva voltada à gestão de ativos vem ganhando cada vez mais destaque no atual cenário econômico e industrial. Essa constatação constitui uma crescente demanda por desenvolvimento de técnicas que permitam a criação e sofisticação de sistemas de detecção de falhas capazes de gerar diagnósticos confiáveis.

Nesse contexto, a revisão acerca das técnicas disponíveis na literatura foi fundamental para familiarizar o autor sobre os conceitos teóricos, métodos de detecção, limitações e outros aspectos inerentes à prática de detecção de falhas por meio da análise de sinais de vibração. A aplicação do método científico se mostrou indispensável para o embasamento e desenvolvimento do estudo desenvolvido, o que representa um ganho permanente para a futura carreira acadêmica e profissional do autor.

O estudo de caso realizado mostrou a importância do processamento dos sinais adquiridos, uma vez que a análise do espectro direto no domínio do tempo apresentou uma resolução insuficiente para a geração de informações indicativas das condições dos mancais.

A aplicação da Transformada Rápida de Fourrier (FFT) representou uma importante ferramenta para a implementação da metodologia aplicada no estudo de caso, permitindo a realização de uma varredura preliminar a fim de restringir as possibilidades de falhas e orientar a varredura da Análise do Envelope. Essa, por sua vez, se mostrou eficaz na detecção das frequências que modulam o espectro. No entanto, verificou-se a ocorrência de um grande número de coincidências entre harmônicos das frequências de rotação do eixo e características de falhas, o que dificulta a identificação das causas do surgimento das frequências moduladoras. Além disso, em alguns casos foram observadas muitas ocorrências de variações acima do limite (de 2% indicado pelas referências), entre as frequências calculadas e as frequências obtidas nas varreduras. Sabe-se que esse efeito pode estar fortemente relacionado a ocorrência de deslizamento dos elementos rolantes. Logo, para o desenvolvimento de futuros estudos, recomenda-se a aplicação de cargas no eixo rotativo a fim de aumentar o atrito entre os elementos em contato, com vistas a minimizar esse efeito. Dessa forma, espera-se aumentar a confiabilidade dos diagnósticos e reduzir as limitações da Análise do Envelope.

Outra recomendação para trabalhos futuros é o estudo de aplicação de técnicas no domínio tempo-frequência, as quais, segundo pesquisas, apresentam bons resultados no diagnóstico de falhas em mancais de rolamento. Logo, técnicas baseadas na transformada Wavelet, por exemplo, são indicadas para contornar as limitações encontradas no presente trabalho, já que essas superam a dificuldade no processamento de sinais não estacionários.

Vale ressaltar que o êxito na implementação de técnicas de detecção voltadas a confecção de sistemas capazes de viabilizar a manutenção preditiva, depende do envolvimento de universidades e empresas nesta disciplina. Empresas e Organizações Européias estão cada vez mais engajadas neste tipo de estudo, visando a otimização do gerenciamento de seus ativos. Como exemplo, pode-se citar a DNV (*Det Norske Veritas*), que já possui um departamento de consultoria – DNV KEMA – voltado ao fornecimento de serviços e soluções para otimização desse gerenciamento.

No Brasil, percebe-se que o conceito abordado ainda se mostra pouco difundido. Logo, é necessário que as universidades brasileiras voltem suas atenções para este tema com vistas ao incremento no desenvolvimento deste conhecimento, tornando-o mais confiável e atrativo para seus usuários.

8. Referências Bibliográficas

- [1] 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.
- [2] TANDON, N.; CHOUDHURY, A. , 1997. “Prediction of vibration amplitudes for defective rolling bearings”. *Int Sound Vibr Digest*, Volume 3, Number 2, Pages 20-25.
- [3] TANDON, N.; CHOUDHURY, A. , 1999. “A Review of Vibration and acoustic measurement methods for the detection of defects in rolling element bearings”. *Tribol Int.* Volume 32, Pages 469-480.
- [4] TANDON, N.; NAKRA, B.C. , 1992. “Comparison of vibration and acoustic measurement techniques for the condition monitoring of rolling element bearings”. *Tribol Int*, Volume 25, Number 3, Pages 205-212.
- [5] TANDON, N.; NAKRA, B.C. , 1993. “Detection of defects in rolling element bearings by vibration monitoring”. *J Instn Engrs – Mech Eng Div*, Volume 73, Pages 271-282.
- [6] MCFADDEN, P.D.; SMITH J.D. , 1984. “Vibration monitoring of rolling element bearings by the high-frequency resonance technique – A review”. *Tribol Int.*,Volume 17, Number 1, Pages 1-10.
- [7] RIPPER, A. P. “Monitoração e Diagnóstico de Máquinas”, COPPE-UFRJ
- [8] PONCI L. , CUNHA P. , Previsão de Falha de Rolamentos por Análise Espectral de Envelope
- [9] SU Y-T, LIN S-J. On initial fault detection of a tapered roller bearing: frequency domain analysis. *J Sound Vibr* 1992;155(1):75–84.
- [10] MARTIN KF, THORPE P. Normalised spectra in monitoring of rolling bearing elements. *Wear* 1992;159:153–60. [] BURGESS PFJ. Antifriction bearing fault detection using envelope detection. *Trans Instn Prof Engrs, New Zealand* 1988;15(2):77–82.

- [11] SHEEN, Y. T. , 2008. “An envelope detection method based on the first-vibration-mode of bearing vibration”. Measurement, Volume 41, Pages 797-809.
- [12] SU, Y. T.; SHEEN, Y.T. , 1993. “On the detectability of roller bearing damage by frequency analysis”. Proc IMechR, PtC: J Mech EngSci, Volume 207, Pages 23-32.
- [13] RANDALL, R.B.; ANTONI, J. , 2011. “Rolling element bearing diagnostic – A tutorial”. Mechanical Systems and Sinal Processing, Volume 25, Pages 485-520.
- [14] SAWALHI, N.; RANDALL, R. B.; ENDO, H. , 2007. “The enhancement of fault detection and diagnosis in rolling element bearings using minimum entropy deconvolution combined with spectral kurtosis”. Mechanical Systems and Sinal Processing Volume 21, Pages 2616-2633.
- [15] MATHEW J, ALFREDSON RJ. The condition monitoring of rolling element bearings using vibration analysis. Trans ASME, J Vibr, Acoust, Stress Reliab Design 1984;106:447–53.
- [16] DYER D. Bearing condition monitoring. In: Interim Report 1. Southampton (UK): Department of Mechanical Engineering, University of Southampton, 1973.
- [17] MESQUITA A., SANTIAGO D., BEZERRA R. , MIRANDA U. , DIAS M. , PEDERIVA R. - Detecção de Falhas usando transformadas Tempo-Frequência – comparação com Análise do Envelope – 2002
- [18] REIS R. , ASMAR P. , ARRUDA E. , LAMIM P. , BRITO J. , “ Detecção de Falhas em Mancais de Rolamento Através da Técnica doE e Transformada Wavelet 2011
- [19] BURGESS PFJ. , Antifriction bearing fault detection using envelope detection. Trans Instn Prof Engrs, New Zealand 1988;15(2):77–82.
- [20] DIEZEL A. , Detecção de Falhas em Mancais de Rolamento utilizando Técnicas de Análise de Vibração - Projeto de Graduação do curso de Engenharia Naval e Oceânica da Universidade Federal do Rio de Janeiro - 2012