



Universidade Federal
do Rio de Janeiro

Escola Politécnica

APLICAÇÃO DE TÉCNICAS DE REMOÇÃO DE RUÍDO EM SINAIS DE MANCAIS DE ROLAMENTO

Lucas Rosa de Sousa

DRE:107387593

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Naval e Oceânica da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro.

Orientador(es): Ulisses A Monteiro, D. Sc.

Rio de Janeiro
Fevereiro de 2014

APLICAÇÃO DE TÉCNICAS DE REMOÇÃO DE RUÍDO EM SINAIS DE
MANCAIS DE ROLAMENTO

Lucas Rosa de Sousa

DRE:107387593

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO CURSO 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 ENGENHEIRO NAVAL E OCEÂNICO.

Examinado por:

Ulisses A Monteiro, D.Sc., UFRJ
(Orientador)

Luiz Antonio Vaz Pinto, D.Sc., UFRJ

Eng. Ricardo Homero Ramírez Gutiérrez, M.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

FEVEREIRO DE 2014

Sousa, Lucas Rosa de.

Aplicação de técnicas de remoção de ruído em sinais de mancais de rolamento/ Lucas Rosa de Sousa. - Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2014.

VIII, 26 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Ulisses Admar Barbosa Vicente Monteiro

Projeto de Graduação – UFRJ/ Escola Politécnica/ Curso de Engenharia Naval e Oceânica, 2014

Referências Bibliográficas: p. 26.

1. Introdução. 2. Resumo Bibliográfico. 3. Fundamentos Teóricos. 4. Estudo de Caso. 5. Conclusões e Recomendações. 6. Referências Bibliográficas. I. Barbosa Vicente Monteiro, Ulisses Admar. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia Naval e Oceânica. III. Aplicação de técnicas de remoção de ruído em sinais de mancais de rolamento.

Dedicatória

Dedico este projeto aos meus pais, Marcia Rosa e Alberto José, que apesar de todas as ótimas peraltices prontadas por mim, continuaram me apoiando e me fizeram chegar aonde cheguei.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador, Ulisses A Monteiro, pela oportunidade e a grande ajuda para a realização deste projeto de graduação. Agradeço a todos os meus amigos, em especial a Gustavo Montfort, que me ajudaram a continuar tentando, me apoiaram em momentos difíceis da minha vida e que estarão comigo nessa nova etapa da vida.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/ UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Naval e Oceânico.

Aplicação de técnicas de remoção de ruído em sinais de mancais de rolamento

Lucas Rosa de Sousa

Fevereiro/2014

Orientador: Ulisses A Monteiro, D.Sc.

Curso: Engenharia Naval e Oceânica

Os mancais de rolamento são os maiores responsáveis por defeitos em máquinas rotativas. O método do envelope é a técnica de análise de vibração mais utilizada para diagnosticar falhas em mancais. Contudo, antes da aplicação desse método, é necessário remover vários tipos de ruídos contidos no sinal adquirido e que dificultam a identificação correta da(s) falha(s).

O objetivo deste trabalho é estudar as várias técnicas de remoção de ruído, tais como predição linear, cancelamento adaptativo de ruído, separação aleatória/ discreta, deconvolução de entropia mínima e curtose espectral e algumas técnicas que melhoram a relação sinal/ruído, facilitando o diagnóstico.

Palavras-chave: cancelamento de ruído, sinais de vibração, falhas em mancais.

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Engineer.

Application of noise cancellation techniques in bearing signals

Lucas Rosa de Sousa

February/2014

Advisor: Ulisses A Monteiro, D. Sc.

Course: Ocean Engineering

The ball bearings are the most responsible for defects in rotating machinery. The method envelope is vibration analysis technique most commonly used for diagnose faults in bearings. However, before applying this method, it is necessary to remove various types of noise contained in the acquired signal and hindering the correct identification (s) fail (s).

The objective of this work is to study the various techniques noise removal, such as linear prediction, cancellation Adaptive noise, random / discrete separation Minimum entropy deconvolution and spectral kurtosis and some techniques that improve the signal / noise ratio, facilitating diagnosis..

Keywords: Noise Cancellation, Vibration signal, bearing faults.

ÍNDICE

1- INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivo	2
2- Resumo bibliográfico	3
3- Fundamentos teóricos.....	5
3.1- Mecanismos de falha.....	5
3.2- Frequências Características de Falha	9
3.3- Cancelamento de Ruído	10
3.3.1- Predição Linear	10
3.3.2- Cancelamento adaptativo de ruído	11
3.3.3- Cancelamento Auto adaptativo de ruído (SANC).....	11
3.3.4 – Cancelamento Discreto/Aleatório (DRS)	12
3.3.5- Média Sincronizada do tempo (TSA).....	13
3.4 – Melhoria na relação Sinal/Ruído	14
3.4.1- Deconvolução de Entropia Mínima (MED).....	14
3.4.2- Curtose Espectral e Curtograma.....	17
Definição	17
4- ESTUDO DE CASO	20
5- CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	25
6- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	26

1- INTRODUÇÃO

Na economia atual, a disputa por mercados gera uma grande pressão para o aumento da produtividade, conseqüentemente, a melhora do desempenho dos equipamentos envolvidos em processos produtivos. Esse cenário cria condições de operação cada vez mais severas, os equipamentos são sujeitos a utilizações em potências próximas ao limite de projeto. Um bom desempenho destes equipamentos sob operações severas, está atrelado à redução de falhas. Essas falhas geram conseqüências financeiras, humanas e até ao meio ambiente.

Um dos meios de reduzir a incidência de falhas é realizando manutenções preditivas. Esta possibilita a identificação de indícios de falhas, contribuindo diretamente para garantir o desempenho do equipamento. A possibilidade de antecipar as falhas permite um planejamento das intervenções a serem realizadas.

Para a utilização desta técnica, devem ser identificados os componentes críticos, ou seja, um componente que se falhar repercutirá em suspensão de operação, colapso de máquinas, o que ocasiona uma queda de produtividade. Em máquinas rotativas, um componente considerado crítico é o mancal de rolamento.

A técnica mais utilizada 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. Impactos periódicos, gerados pela passagem dos elementos rolantes pelos defeitos, excitam pulsos em frequências elevadas. A partir destas, são geradas bandas espectrais avaliáveis quanto a intensidade e distribuição de energia. Para a realização destas análises, é necessária a utilização de uma combinação de técnicas de processamento destes sinais.

1.1 Objetivo

O espectro do sinal original normalmente contém pequenas informações de diagnósticos de falha em mancais de rolamento, e por tantos anos, foi estabelecido que a técnica referência fosse a análise de envelope, onde o sinal tem a banda filtrada numa banda de alta frequência que tem os impulsos, provenientes da falha, amplificados por ressonâncias estruturais. A amplitude demodulada que formará o sinal envelopado. O seu espectro conterá as informações desejadas dos diagnósticos em termos de, tanto da frequência da repetição (frequência Ballpass), quanto a modulação da frequência apropriada, onde a falha está passando pela zona de carregamento.

O sinal a ser analisado não é composto apenas de vibrações que interessam, normalmente ele possui sinais fortes que podem comprometer o resultado, como a vibração gerada pela rotação do eixo. Existem algumas técnicas que melhoram o sinal a ser analisado, aplicam métodos para o cancelamento de ruído (sinal que não trará informações úteis para o diagnóstico) e métodos para a melhoria na relação sinal/ruído.

O objetivo deste trabalho é estudar as várias técnicas de remoção de ruído, tais como predição linear, cancelamento adaptativo de ruído, separação aleatória/discreta, deconvolução da mínima entropia, curtose espectral e algumas técnicas que melhoram a relação sinal/ruído, facilitando o diagnóstico.

2- RESUMO BIBLIOGRÁFICO

Para o presente trabalho, elaborou-se uma pesquisa bibliográfica a fim de permitir acesso à teoria, orientações sobre as técnicas e estudos de caso, e a validações relativas à eficácia das técnicas.

Os autores MCFAADDEN e SMITH [1], fazem uma revisão da técnica do envelope. Segundo eles, toda vez que um defeito atinge um elemento em contato, é gerado um pulso de curta duração que excita ressonâncias periodicamente, caracterizadas pela frequência das falhas relacionadas à localização do defeito. Essas ressonâncias aparecem moduladas em amplitudes nas frequências de falha. Em seus estudos, a aplicação da demodulação de uma dessas ressonâncias mostra bons resultados, retornando sinais indicativos das condições do rolamento. A partir de um modelo simples de vibração, o aparecimento de várias linhas espectrais causadas por diferentes localizações de defeitos no espectro demodulado é explicado.

PONCI e CUNHA [2] 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 e etc... 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, identificando os componentes defeituosos do sistema. Os autores validaram estes conceitos através da aplicação da técnica do envelope para detecção de falhas em um mancal de uma bomba de alimentação de caldeira.

A partir de R. BARILLI [3], a detecção das frequências características de falhas é difícil de ser realizada por meio da utilização de uma análise espectral simples. Segundo RANDALL et al [4], mesmo após a aplicação 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. 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.

Os autores RANDALL e ANTONI [4] apresentam técnicas para melhorar a análise do diagnóstico dos sinais da aceleração dos mancais de rolamento, em particular na presença de sinais fortes de outros componentes da máquina que os encobrem. A técnica de separação discreta/aleatória é normalmente a mais eficiente. Sinais provenientes de falhas localizadas são impulsivos, pelo menos na origem, necessitam de técnicas para identificar onde essas bandas de frequência onde essa impulsividade é mais marcante, usando curtose espectral. Para rolamentos de alta velocidade, o forte impacto no rolamento pode ter um comprimento comparável a separação, então, a técnica de deconvolução da entropia mínima (*minimum entropy deconvolution*) é útil para a remoção do efeito de mancha criado pelo caminho da transmissão. Uma dessas técnicas para melhoramento do sinal será utilizada para uma melhor análise do projeto do Projeto de Graduação do Rodrigo Barilli [3], que trata da análise do envelopamento para identificação de falhas em mancais de rolamento.

3- FUNDAMENTOS TEÓRICOS

3.1- Mecanismos de falha

Os mancais de rolamento têm por meta suportar uma carga, em geral caracterizada por um eixo, e permitir o movimento rotacional deste em relação à estrutura da máquina rotativa. Segundo N.TANDON e A. CHOUDHURY [5,6], o contato suave entre os componentes do mancal de rolamento é o maior responsável pelo funcionamento apropriado destes dispositivos.

Os principais componentes de um mancal de rolamento são: pista externa, pista interna, gaiola e elementos rolantes, como são demonstrado a seguir na figura 1:

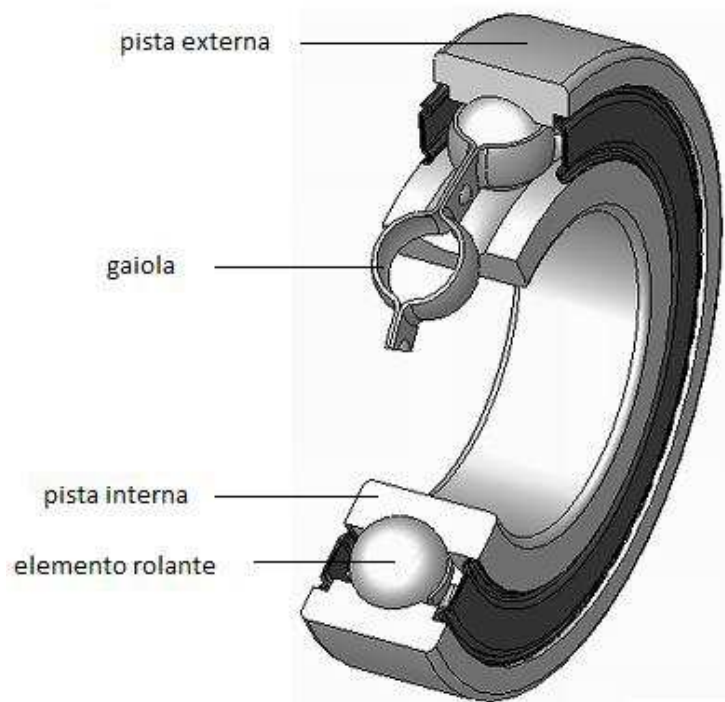


Figura 1 - Principais componentes de um Rolamento (Fonte: Google Images)

Segundo N.TANDON e A. CHOUDHURY[5,6], a presença de um defeito altera significativamente os níveis de vibração em um mancal em virtude dos pulsos de curta

duração gerados pela interação entre a falha e um elemento adjacente. Quando um elemento rolante colide com uma falha localizada, ocorre uma excitação de ressonâncias na estrutura. Essa característica cria expectativas sobre métodos eficientes de diagnóstico, com isso os sinais da vibração gerados pelas falhas vêm sendo amplamente estudado.

Ainda de acordo com os autores supracitados, a melhor forma de analisar o sinal do rolamento defeituoso depende do tipo de falha presente. Os defeitos em mancais podem ser divididos em dois tipos: Locais ou Distribuídos. A principal diferença entre estes tipos é o tamanho inicial da falha, pequena para localizada, como ilustrado na figura 2 e grande para a falha distribuída como ilustrado na figura 3:

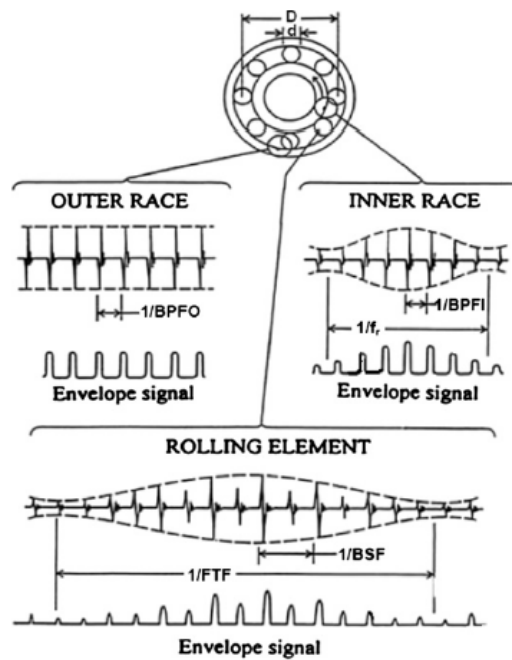


Figura 2 - Sinal típico de rolamento com falha localizada

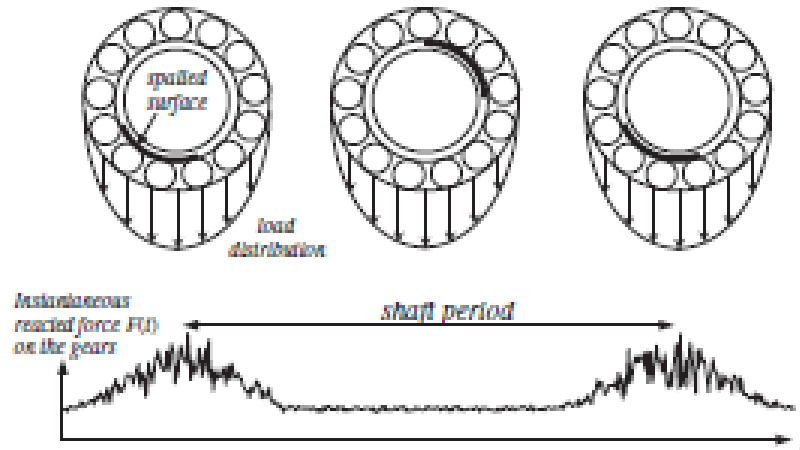


Figura 3 - Típico sinal modulado proveniente de uma falha distribuída na pista interna

De acordo com BARILLI R [3], os defeitos distribuídos podem ser exemplificados por rugosidades superficiais, desalinhamento entre as pistas rolantes e elementos rolantes de tamanhos diferentes. Esses defeitos normalmente são ocasionados por erro nos processos de fabricação, instalação inapropriada ou desgaste das partes.

Já defeitos localizados são exemplificados por trincas, corrosões, lascas ou estilhaços nas superfícies em rotação. O modo de falha predominante em mancais de rolamento é a fragmentação das pistas, causada a partir de uma trinca que se propaga até a superfície do material, liberando uma lasca. A trinca por fadiga pode ser causada pelo mau dimensionamento da carga máxima que o mancal suporta, ou devido a colisões durante o processo de operação ou instalação. A figura 4 ilustra um defeito ocorrido pelo mau dimensionamento:



Figura 4 - Defeito pista interna proveniente do carregamento

De acordo com RIPPER [8], a manutenção preditiva pode ser aplicada com o intuito de prolongar a vida útil do rolamento, por meio do monitoramento de parâmetros característicos do estado em que a máquina está operando. O monitoramento que se destaca é o de níveis de vibrações, o qual dá um retorno com mais informações sobre as condições do equipamento.

Os elementos rolantes, mesmo quando em condições perfeitas, geram vibrações. Inúmeras técnicas de análise são utilizadas na detecção e diagnóstico de falhas em mancais de rolamento por análise de vibração.

3.2- Frequências Características de Falha

Segundo N.TANDON e A. CHOUDHURY[5,6], um defeito em um elemento particular do rolamento, pode provocar um aumento da energia vibracional na frequência rotacional desse elemento.

Os defeitos podem ocorrer em qualquer parte do rolamento e causam vibrações de alta frequência. Na maioria dos casos é possível identificar qual o elemento defeituoso pela singularidade da vibração causada. Defeitos nas pistas e nos elementos rolantes são facilmente detectados, mas o mesmo não pode ser dito dos defeitos nas gaiolas. Existem inúmeras técnicas para detectar onde os defeitos estão ocorrendo, mas nenhuma prevê quando o defeito do rolamento se tornará um defeito funcional.

As equações (1) a (4) fornecem as expressões para a estimativa das frequências características de falha de um mancal de rolamento. Vale ressaltar que as frequências de falha não são totalmente dependentes da velocidade de rotação. Conforme apresentado por N.TANDON e A. CHOUDHURY [5,6]:

- **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 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.

3.3- Cancelamento de Ruído

De acordo com RANDALL [4], um dos maiores influenciadores no fraco sinal do rolamento é o ruído proveniente dos eixos, já que esses ruídos são fortes até em rolamentos sem problemas. Mesmo em outras máquinas, normalmente estão presentes fortes componentes de frequência que podem contaminar as bandas de frequência aonde o sinal dos rolamentos até então eram predominantes. Então, é vantajoso remover tal frequência discreta antes de proceder para a análise do diagnóstico do rolamento.

Este capítulo apresenta técnicas, que na maioria dos seus casos obteve sucesso, para a separação dos sinais, onde a separação discreta/aleatória é normalmente a mais eficiente, e com isso melhorar o diagnóstico dos sinais da aceleração dos rolamentos.

3.3.1- *Predição Linear*

Essa técnica basicamente é um modelo determinístico de obter parte do sinal, baseado num certo número de amostras exatamente anteriores, e então se usa esse

modelo para prever o próximo na série. A parte do sinal residual (que não se prevê) é obtida através da subtração do sinal atual.

O modelo usado para a predição linear é um modelo “Auto regressivo”, como descrito na equação 5:

$$y(n) = - \sum_{k=1}^p a(k)x(n - k) \quad (5)$$

Onde:

$y(n)$ é obtido da soma dos valores anteriores de p .

O valor atual é dado pela soma do valor previsto e o termo do ruído:

$$x(n) = y(n) + e(n); \quad (6)$$

3.3.2- Cancelamento adaptativo de ruído(ANC)

É um procedimento onde um sinal primário contendo dois componentes não relacionados, pode ser separado usando um sinal referência contendo um dos dois. Este não necessita ser idêntico ao correspondente no sinal primário, apenas relacionado através de uma função de transferência linear. A técnica encontra essa função de transferência do sinal e então a retira do sinal primário, restando apenas o outro componente.

3.3.3- Cancelamento Auto adaptativo de ruído (SANC)

Quando um dos dois componentes a ser separado é determinístico (Frequência discreta) e o outro é aleatório, pode ser feito uma versão atrasada do sinal primário para o sinal de referência, porque se esse atraso for maior em comprimento que o sinal aleatório, o filtro adaptativo não reconhecerá a relação e encontrará uma função de transferência entre a parte determinística do sinal e a versão atrasada dele mesmo.

Então, a separação pode ser alcançada utilizando apenas um sinal, esse procedimento é chamado de cancelamento auto adaptativo do ruído. Esse procedimento é ilustrado na figura 5:

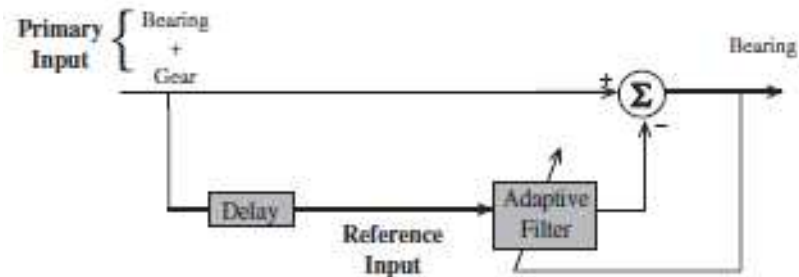


Figura 5 - Esquema do cancelamento auto-adaptativo do ruído usado para remoção de uma interferência periódica (Eixo), restando sinal aleatório (Rolamento)

3.3.4 – Cancelamento Discreto/Aleatório (DRS)

De acordo com RANDALL [4], o cancelamento auto adaptativo de ruído, como um filtro adaptativo, é capaz de ajuste para pequenas variações de velocidade. Isso acarreta num estágio de convergência que pode durar bastante, especialmente para filtros de ordem alta. Em circunstâncias onde os componentes a serem perseguidos são estáveis no tempo, adaptação não é necessária e uma estimativa muito mais eficiente pode ser feita. Desde que o objetivo é encontrar um filtro que prevê o valor do sinal a partir da sua versão atrasada, e isso pode ser alcançado facilmente no domínio da frequência calculando a Função de Resposta da Frequência (FRF) entre dois blocos dos dados, distantes um certo atraso Δ . Denotando $Y(f)$ e $Y_a(f)$ as transformadas Fourier dos dois blocos a uma frequência f , a FRF corresponde a:

$$H(f) = \frac{E(Y(f) \cdot Y_a^*(f))}{E|Y(f)|^2} \quad (7)$$

O valor esperado da equação 7 é alcançado pela média dos vários blocos. A transformada de Fourier, teoricamente retorna onde os sinais são correlacionados, o valor da unidade nas frequências dos componentes discretos. A figura 6 mostra um

resultado típico da utilização do cancelamento discreto/aleatório para separar o sinal de vibração da caixa de câmbio em componentes determinísticos (a maioria do eixo) e as componentes aleatórias (neste caso composto por uma falha da pista rolante externa do rolamento):

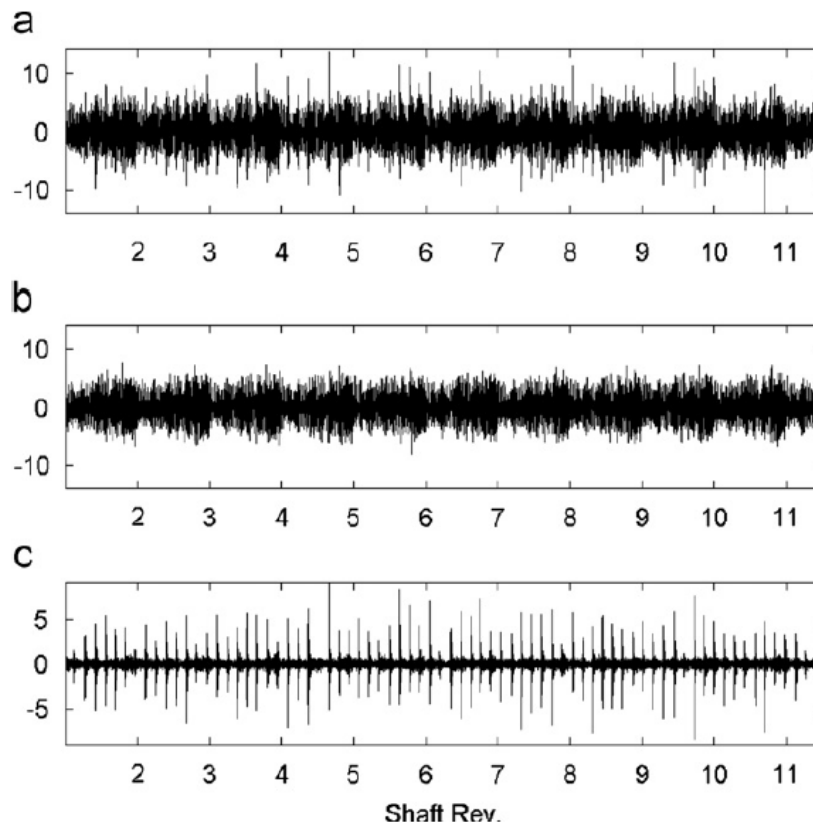


Figura 6 - (a) Sinal da Vibração medida; (b) parte periódica extraída (eixo); e (c) parte não determinística extraída (rolamento).

3.3.5- Média Sincronizada do tempo (TSA)

Em casos raros pode ser necessária à remoção dos componentes da frequência discreta com o mínimo desmembramento do sinal residual, e isto é feito mais facilmente utilizando a TSA. Entretanto, o trabalho torna-se tedioso pela necessidade da operação separada para cada harmônico diferente do sinal e reamostragens separadas para cada caso, para então ter a média.

A média sincronizada do tempo é feita através da média da série dos segmentos do sinal, cada um correspondendo a um período de um sinal sincronizado.

3.4 – Melhoria na relação Sinal/Ruído

Até mesmo após a remoção da frequência discreta do sinal, o sinal do rolamento normalmente estará mascarado em várias bandas de frequências de outros ruídos e pode acabar tornando-se menos impulsivo do que na origem. Esse é um caso comum com rolamentos de alta velocidade, onde as frequências de falha do rolamento são tão altas e separadas por intervalos de tempo tão pequenos que torna o Impulso de Resposta (IR) ter o mesmo comprimento destes intervalos entre eles. RANDALL [4] apresenta um método conhecido como Mínima entropia de deconvolução (MED), que remove o efeito do caminho de transmissão e então outros métodos para a amplificação do sinal do rolamento.

3.4.1- Deconvolução de Entropia Mínima (MED)

Deconvolução da Entropia Mínima (MED) é um método designado para restringir os IRF's de espalhar, e então sinais perto do original do impulso são obtidos.

Foi primeiramente proposto por Wiggins [9] para aguçar os reflexos das diferentes camadas subterrâneas da análise. A ideia básica é encontrar um filtro inverso que neutraliza o efeito do caminho da transmissão, assumindo que a excitação original foi impulsiva e então contendo alto curtose. O aumento da entropia corresponde ao aumento da desordem, enquanto os sinais impulsivos são muito bem estruturados, exigindo que todos os componentes da frequência significativa tenham, simultaneamente, fase zero no momento de cada impulso. Então, minimizar a entropia maximiza a estrutura do sinal, e isso corresponde a maximização do curtose da saída do filtro inverso (correspondendo a entrada original do sistema)

A figura 7 ilustra esta ideia básica. O sinal forçado $e(n)$ passa pelo filtro estrutural h , que tem os componentes de saída misturados com ruído $v(n)$ para ter a saída medida $x(n)$. O filtro inverso (MED) f produz uma saída $y(n)$, que deve ser o mais

perto possível do componente de entrada $e(n)$. Mas o componente de entrada $e(n)$ não é conhecido, mas é assumido que seja o mais impulsivo possível.

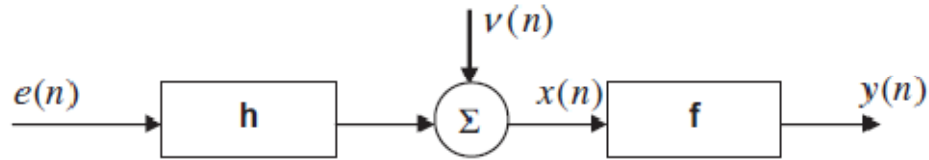
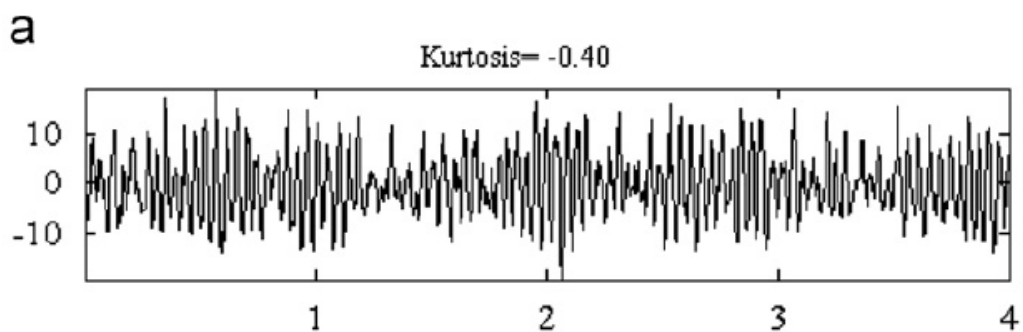


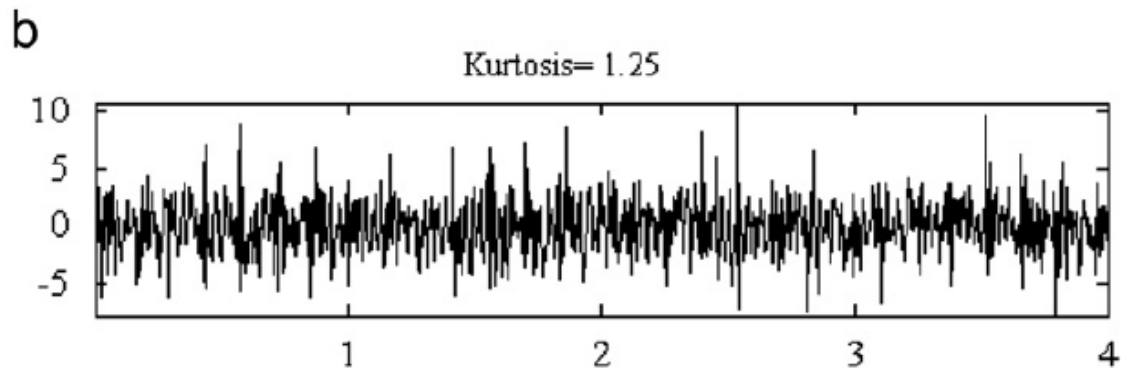
Figura 7 - Filtro inverso do processo MED

O filtro f é modelado como um filtro FIR:

$$y(n) = \sum_{l=1}^L f(l)v(n - l) \quad (8)$$

Abaixo, um exemplo de um rolamento de alta velocidade similar aos usados em motores de turbina a gás. Primeiramente, os componentes da frequência discreta relacionados aos harmônicos da rotação do eixo da máquina de ensaio foram removidos, através do filtro de predição linear, na figura representado como (a) para (b) o uso do filtro de predição linear e o conseqüente aumento de curtose, de 0,40 para 1,25:





A predição linear tornou visíveis os pulsos, mas por causa da alta velocidade de rotação (12000 rpm), os impulsos excitados possuem um comprimento do tamanho do seu espaçamento, tendendo assim a se sobrepor.

Após a aplicação do MED (Minimum Entropy Deconvolution), a curtose foi aumentada para 38.6 como ilustrado na figura 8. Esse valor é ajustado para retornar os sinais Gaussianos igual a 0.

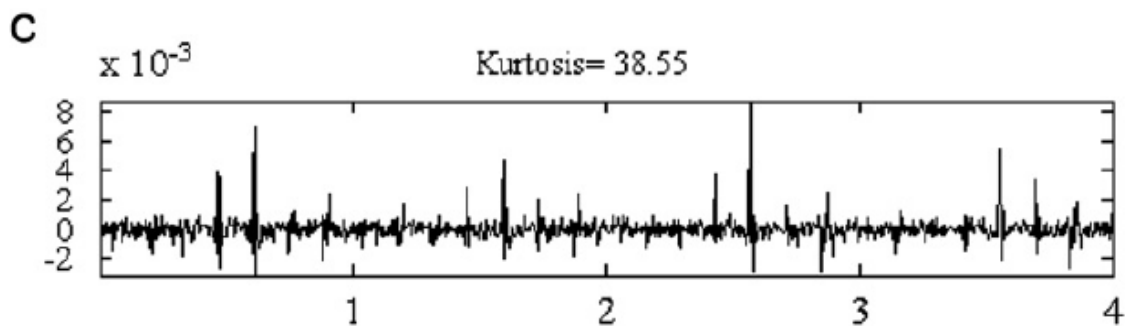


Figura 8 - Sinal após aplicação do MED

Esta falha apresentada anteriormente está num estágio bem avançado, mas se utilizado a técnica “Deconvolução da entropia mínima” poderia ter sido detectado muito antes.

3.4.2- Curtose Espectral e Curtograma

Desde o início da análise do envelope, vem se discutindo qual a banda que mais se adéqua para a demodulação. O uso do “Spectral Kyurtosis” (SK) e o Kurtograma solucionam, encontrando a banda mais impulsiva (depois a remoção da frequência discreta).

O curtose espectral provê um meio de determinar qual banda de frequência contém a máxima impulsividade. É baseado na transformada de pequeno tempo de Fourier, e dá o quanto impulsivo o sinal é em função da frequência. Quando foi proposto por Stewart [10], curtose tinha sido largamente utilizado para medir o nível de falha em máquinas, mas existiam apenas vagas sugestões que tornassem os resultados claros usando a filtragem de bandas de frequência, e então o conceito do curtose espectral não foi realmente desenvolvido.

Definição

O curtose espectral é uma extensão do conceito de curtose, que é um valor global, para uma função da frequência que indica como a impulsividade é distribuída, se houver, pelo domínio do tempo. O princípio é análogo no que diz respeito ao PSD, que decompõem a força do sinal VS frequência, como pode ser visto na figura 9. Isso faz a curtose espectral uma poderosa ferramenta para detecção da presença de transientes no sinal, até mesmo quando o sinal está misturado a ruídos fortes, ao indicar em qual banda de frequência os transientes tomam lugar.

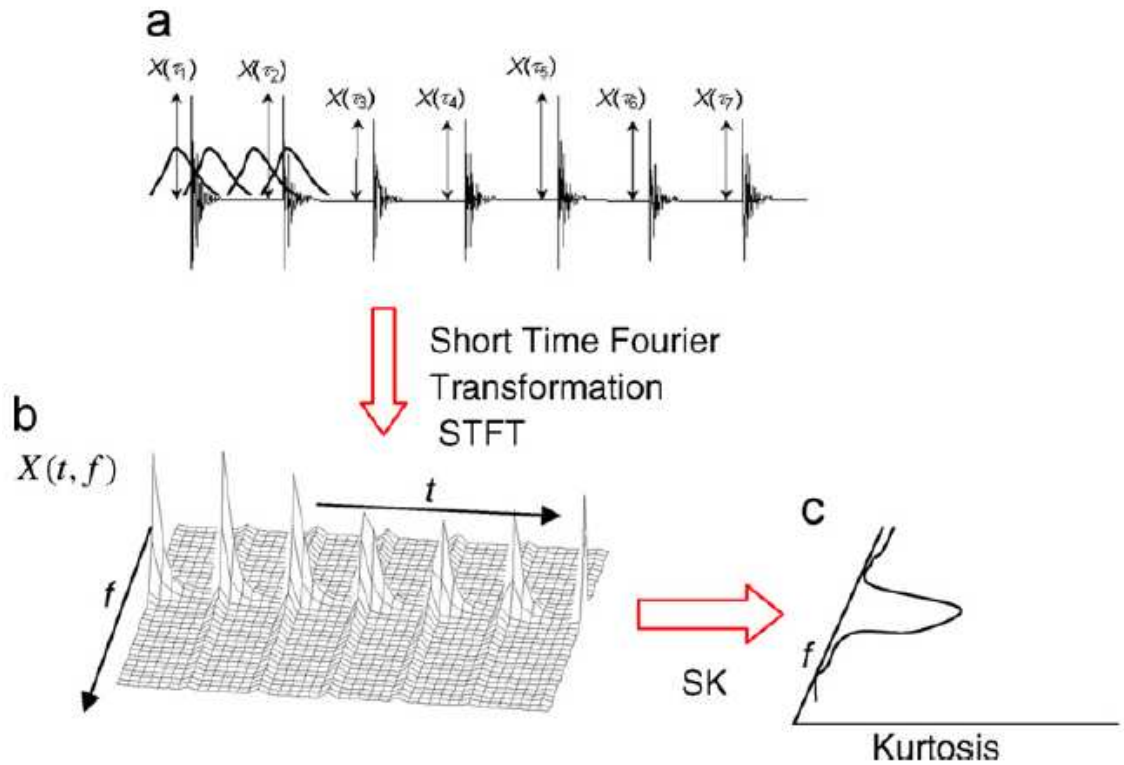


Figura 9 - cálculo do espectro Curtose para um sinal de falha simulada: (a) Sinal simulado do tempo; (b) STFT; e (c) Espectro curtose em função da frequência.

O espectro Curtose do sinal $x(t)$ é calculado a partir da STFT (*Short Time Fourier Transform*), que é a transformada local de Fourier no instante t obtida passando uma janela pelo sinal. Quando visto como uma função da frequência, o quadrado da magnitude retorna a força do espectro no momento t . Quando visto como uma função do tempo, pode ser interpretado como o envelope do sinal complexo $x(t)$. Isso pode ser facilmente detectado calculando o Curtose do envelope complexo $X(t, f)$, como representado na equação 9:

$$K(f) = \frac{\langle |X(t, f)|^4 \rangle}{\langle |X(t, f)|^2 \rangle^2} - 2 \quad (9)$$

Curtose espectral como filtro

Os valores que levam as frequências onde o impulso do sinal da falha do rolamento é dominante e teoricamente com ruído estacionário, são altos, logo faz mais sentido usar o curtose espectral como uma função filtro para filtrar apenas a parte do sinal com o maior nível de impulsividade.

Curtograma

O curtose espectral, e o filtro que pode ser obtido deste, dependerá da escolha do comprimento da janela do STFT (*Short time Fourier Transform*), ou da largura de banda do filtro passa-banda, que emite o envelope complexo do sinal. Uma solução para auxiliar nessa escolha, é exibir o Curtose espectral também como função do comprimento da janela, dando assim uma origem a uma representação tridimensional, chamado Kurtogram, ou seja, nada mais do que uma cascata de curtoses espectrais obtidos para diferentes comprimentos de janela de STFT. A figura 10 ilustra o Kurtogram de uma falha fraca no rolamento de uma caixa redutora:

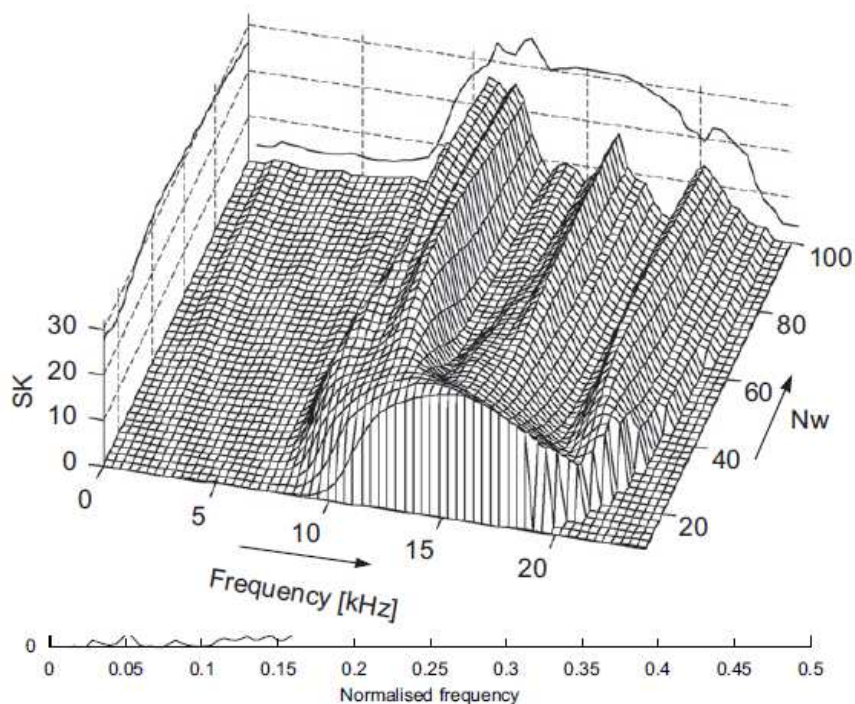


Figura 10 - Curtograma de uma caixa redutora. Nw é o comprimento da janela, SK o Curtose espectrais

Kurtogram rápido

A geração do kurtogram para todas as combinações possíveis de frequências e larguras de banda é dispendioso e não conveniente para propósitos práticos. Existem soluções consideráveis obtidos de subdivisões das larguras de banda em razões racionais que permite um processamento rápido.

4- ESTUDO DE CASO

De acordo com R. BARILLI [3], 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, um excesso de carga 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 indentação mecânica. O estudo de caso da caixa de câmbio apresentado neste projeto, é a partir da primeira abordagem, operação até a falha, mas acelerado por uma condição extrema.

RANDALL [4] demonstra um método proposto para diagnosticar falhas em rolamentos, o qual obteve sucesso para uma ampla faixa de casos, de rolamentos dos motores de alta velocidade de turbinas a gás a rolamento principal de torres de radar, com um período de rotação de 12 segundos. Este método é considerado semi-automatizado, apenas alguns parâmetros precisam ser ajustados para cada caso, como dimensão e velocidade do rolamento. Como demonstrado na figura abaixo, o método como uma combinação de um número de técnicas já descritas no capítulo 3.

- ① **Order tracking – Remove speed fluctuation**
- ② **DRS, SANC or Linear Prediction - Remove discrete frequencies**
- ③ **MED – Remove smearing effect of signal transfer path**
- ④ **SK – Determine optimum band for filtering and demodulation**
- ⑤ **Envelope analysis – Determine fault characteristic frequencies**

Figura 11 - Procedimentos semi automatizados para diagnóstico dos mancais rolamentos

Para a separação da frequência discreta e dos componentes aleatórios a melhor técnica, geralmente, é DRS (Discret..), a qual retorna menos problemas no que diz respeito a escolha dos parâmetros.

A técnica MED só é aplicável para rolamentos de alta velocidade, onde os impulsos têm comprimentos comparáveis ao espaçamento dos pulsos de falha do rolamento.

A banda ótima para demodulação deve ser escolhido usando um procedimento rápido kurtogram. O kurtogram é sensível a grandes impulsos aleatórios que podem estar presentes em algumas realizações de sinal. Se o espectro de envelope final não revelar as componentes periódicas, mesmo que com SK alto, deve verificar se tais impulsos aleatórios de uma fonte estranha são dominantes em determinadas faixas de frequência.

Na análise final do envelope, deve ser reconhecido que os efeitos da modulação são importantes para o diagnóstico. Em geral, as falhas da pista interna devem ser moduladas na velocidade do eixo, e os elementos rolantes na velocidade da gaiola. Para carga unidirecional, uma falha de pista externa não seria modulada, mas a modulação na velocidade do eixo pode ocorrer devido às forças significativas do desbalanceamento ou desalinhamento, e modulação em velocidade gaiola pode resultar em variações entre os elementos rolantes.

4.1 Caso da Caixa Redutora do helicóptero

Um teste foi realizado em uma caixa redutora de helicóptero em DSTO (Organização de Ciência e Tecnologia de Defesa) Melbourne, Austrália. Ela foi utilizada sob carga pesada até a falha. Os sinais foram analisados sem a indicação do tipo de falha.

As análises iniciais dos sinais, mesmo no final do teste onde a falha do rolamento foi indicada pelo crescimento de detritos de desgaste, não mostrou qualquer indicação da falha tanto no sinal de tempo quanto no Espectro. O último foi dominado por componentes da engrenagem (harmônicos das frequências principais de geração de malha e as suas faixas laterais) sobre toda a gama de frequências até 20 kHz, com curtose do sinal original igual a 0,6.

O procedimento apresentado na figura 11 foi aplicado, e neste caso, os componentes da frequência discreta foram removidos por predição linear. A figura 12 compara o resíduo do processo de predição linear com o sinal original, que se tornou mais modulado (Curtose aumentou para 2,2):

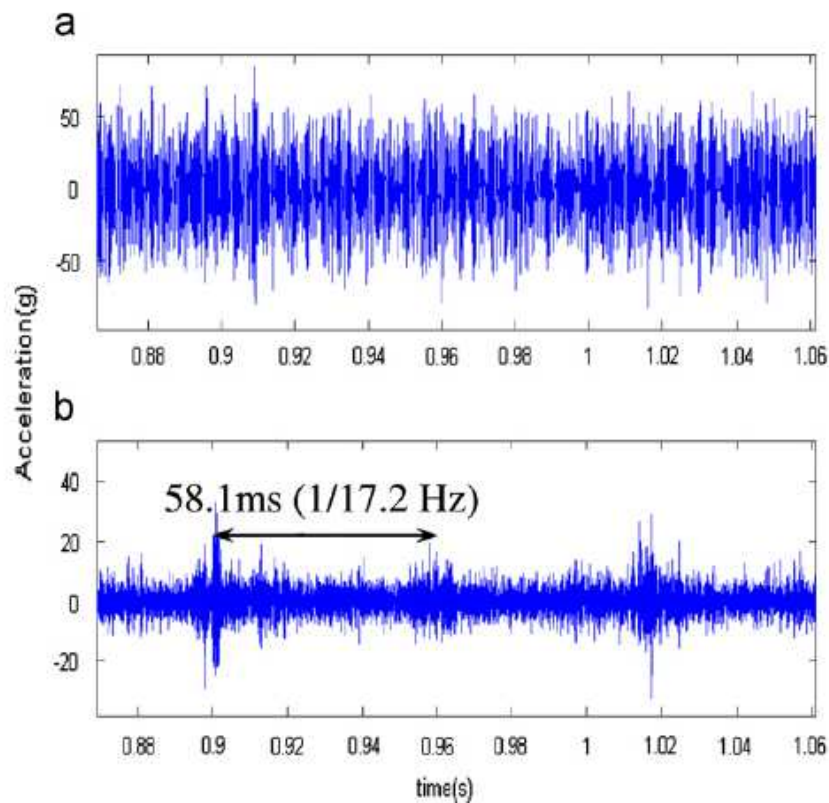


Figura 12 – Comparação entre (a) o sinal original e o (b) resíduo do processo da predição linear

Finalmente, a figura 13 mostra o espectro de envelope quadrado em duas faixas de frequência, pela última medição: figura 13 (a) mostra um forte padrão de harmônicas espaçadas na velocidade da gaiola de um rolamento planeta. Este, basicamente, dá uma indicação de que há uma variação para cada rotação da gaiola. Esta pode ser uma falha da gaiola, mas é muitas vezes um indicador de variação entre os elementos de rolamento. Figura 13 (b), numa gama de frequências um pouco mais elevada, apresenta um forte componente correspondente à frequência da passagem do elemento rolante pela pista interna (BPFI). Por se tratar de um rolamento planeta, não é esperado uma modulação para uma falha de pista interna, e não são encontrados modulações de bandas no espectro do envelope. Quando a caixa de velocidades foi desmontada, fragmentações severas foram encontradas na pista interna de um rolamento planeta e três rolamentos tinham fragmentações menores, explicando a modulação em velocidade gaiola.

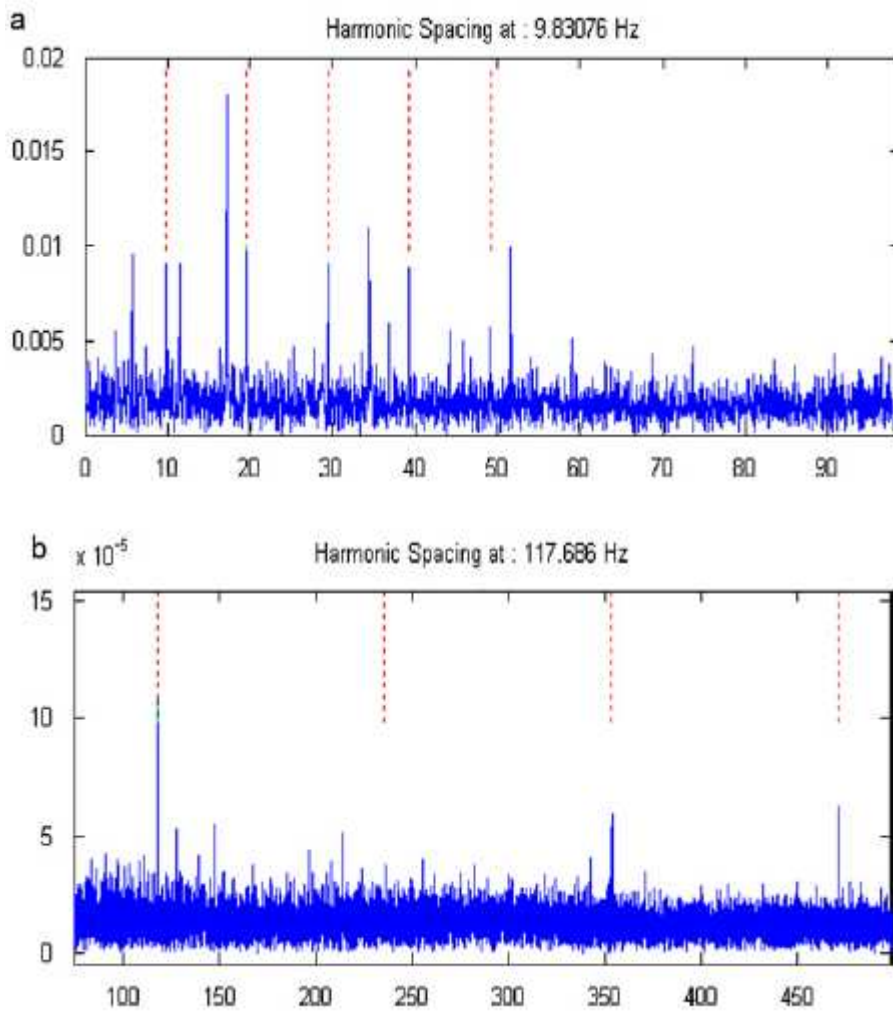


Figura 13 - Espectro envelope quadrado em duas faixas de frequência: (a) Espaçadas Velocidade da Gaiola (b) Frequência Ballpass

5- CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Ao fim deste relatório, concluiu-se que a manutenção preventiva é uma alternativa bastante eficaz para a continuidade dos processos produtivos, o que a faz ganhar cada vez mais destaque no atual cenário econômico. Conforme este destaque aumenta, mais investimentos em desenvolvimento de novos métodos de predição e detecção de falhas ocorrerão, obtendo cada vez mais resultados satisfatórios.

A pesquisa bibliográfica sobre este assunto possibilitou o autor deste projeto conhecer sobre as técnicas de remoção de ruídos, melhoramento da razão sinal ruído, indicações e limitações das técnicas, detecção de falhas por meio de análise de sinais de vibração. Isso acarreta em um conhecimento que será levado pela vida profissional.

As técnicas aqui apresentadas seriam de grande utilidade para obter melhores resultados da análise de envelope do projeto de graduação do aluno R BARILLI [3]. A utilização destas no sinal modulado iria tirar vibrações de ruído, melhorar a razão sinal/ruído, sobrando um sinal mais “limpo” para a execução da análise do envelopamento, conseqüentemente, obter melhor resultados para os diagnósticos.

6- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] 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.
- [2] PONCI L. , CUNHA P. , Previsão de Falha de Rolamentos por Análise Espectral de Envelope
- [3] BARILLI R., Análise de Falhas em Mancais de Rolamento Utilizando a Técnica do Envelope - Projeto de Graduação do curso de Engenharia Naval e Oceânica da Universidade Federal do Rio de Janeiro - 2013
- [4] RANDALL, R.B.; ANTONI, J. , 2011. “Rolling element bearing diagnostic – A tutorial”. Mechanical Systems and Signal Processing, Volume 25, Pages 485-520.
- [5] TANDON, N.; CHOUDHURY, A. , 1997. “Prediction of vibration amplitudes for defective rolling bearings”. Int Sound Vibr Digest, Volume 3, Number 2, Pages 20-25.
- [6] 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.
- [7] RIPPER, A. P. “Monitoração e Diagnóstico de Máquinas”, COPPE-UFRJ
- [8] WIGGINS, R.A. “Minimum Entropy Deconvolution, Geoexploration”. Vol. 16, Elsevier Scientific Publishing, Amsterdam, 1978, pp. 21–35.
- [9] D. Dyer, R.M. Stewart, Detection of rolling element bearing damage by statistical vibration analysis, ASME Paper, 26–30 September, 1977