



## COMPARAÇÃO DE REPRESENTAÇÕES CONJUNTAS TEMPO– FREQUÊNCIA APLICADAS NA ANÁLISE DE FALHAS EM SISTEMAS ENGRENADOS

**Marcos Antônio da Silva Irmão**

Universidade Federal da Paraíba – UFPB, Av. Aprígio Veloso, 882, Bodocongó, C.P 58109 – 970, Campina Grande, PB, [mirmao@yahoo.com](mailto:mirmao@yahoo.com)

**Antonio Almeida Silva**

Universidade Federal da Paraíba – UFPB, Av. Aprígio Veloso, 882, Bodocongó, C.P 58109 – 970, Campina Grande, PB, [almeida@dem.ufpb.br](mailto:almeida@dem.ufpb.br)

**Resumo.** Entender os fenômenos de surgimento e desenvolvimento de falhas em sistemas engrenados tem se tornado uma tarefa importante nas fases de projeto e manutenção. Geralmente, os sinais de vibrações que estes sistemas emitem são multi-componentes e não estacionários devido às forças de engrenamento serem do tipo transientes, que surgem a partir do contato superficial entre os dentes com algum tipo de imperfeição, desgastes, trincas, etc., e se propagam na forma de vibrações podendo excitar várias frequências de ressonância do sistema. A análise espectral clássica aplicada na detecção de falhas têm apresentado limitações, especialmente quanto ao surgimento de componentes espúrias que contaminam o espectro, e dificultam a interpretação pelos analistas.

Este trabalho tem por objetivo fazer uma revisão bibliográfica sobre as representações tempo-frequência aplicadas na análise de falhas em sistemas engrenados, aprofundar os estudos relacionados à geração de sinais que simulem várias situações de funcionamento dos sistemas engrenados sob o aspecto dinâmico, e em seguida aplicar algumas representações tempo-frequência nestes modelos, como o espectrograma e a distribuição Pseudo Wigner-Ville. A partir da análise com sinais simulando algumas condições de falhas típicas, será possível destacar a sensibilidade destes métodos e indicar uma ferramenta mais adequada à detecção e diagnóstico de falhas nestes sistemas.

**Palavras-chave:** Métodos tempo-frequência, Análise de falhas, Sinais de vibração, Sistemas engrenados.

### 1. INTRODUÇÃO

As principais falhas que surgem em sistemas engrenados estão relacionadas com problemas existentes no dente ou no eixo, ou ainda a uma combinação destes. As falhas relacionadas ao dente podem ser oriundas de desgastes, riscos e trincas e as falhas relacionadas ao eixo podem ser devidas ao desalinhamento e desbalanceamento. Atualmente, o uso de recursos preditivos para estudo de falhas em máquinas vem ganhando grande espaço, especialmente utilizando parâmetros de controle da condição como sinais de vibração, acústico, elétrico, térmicos, além de alguns testes não-destrutivos. Porém o sinal de vibração é considerado pelos especialistas como o mais representativo na detecção de falhas (Staszewski, Worden e Tomlinson, 1997).

Dentre as máquinas rotativas presentes na indústria, os sistemas engrenados é um dos subconjuntos que mais se destacam, em especial na indústria automotiva e aeronáutica. O monitoramento destes pode ser realizado através da análise de sinais de vibração para fins de

projeto (controle de qualidade), conforme citado por Menegatti e Duarte (1999), ou para fins de manutenção (monitoramento de condição), conforme Lima (1985) e McFadden (2000).

Neste trabalho, inicialmente, será feita uma breve revisão bibliográfica das técnicas de detecção e diagnóstico de falhas em engrenagens. Em princípio será feita a caracterização de modelos de sinal de vibração num par de engrenagens normal, discutindo-se sobre as frequências de engrenamento e suas harmônicas, bandas laterais, componentes espúrias e suas fontes, e características do sinal modificado pela introdução de defeitos do tipo trincas, *pitting* e outros que produzem um sinal de vibração mais complexo.

Na seqüência serão discutidas algumas técnicas de análise, que estão divididas em três classes, ou seja, nos domínios do tempo (indicadores gerais, sinal médio no tempo), da frequência (espectro de Fourier e Cepstrum) e tempo-frequência (espectrograma e distribuição pseudo Wigner-Ville). São aplicadas duas técnicas tempo-frequência, objeto deste trabalho, para a análise de sinais de vibração simulando um sistema engrenado com algumas falhas típicas, a fim de averiguar a sua viabilidade como técnica capaz de diagnosticar falhas nos sistemas físicos reais.

## **2. PRINCIPAIS FALHAS DOS SISTEMAS ENGENRADOS - REVISÃO**

Como conseqüência da impossibilidade de se fabricar componentes mecânicos tecnicamente perfeitos e garantia de que estes sejam montados e operados de maneira adequada, as máquinas sempre estarão sujeitas a vibrações. Dentro do processo de conversão de força em trabalho útil, surgem forças que são devidas a imperfeições geométricas e contatos entre superfícies em movimentos, que por sua vez irão provocar vibrações e ruídos que irão possibilitar a indicação da condição de máquina. A principal imperfeição que ocorre no funcionamento das engrenagens é o desvio do perfil do dente, quando comparado com o perfil perfeito, e as principais fontes deste desvio são as deflexões do dente devido a cargas estáticas e dinâmicas e os erros na geometria do dente, que são causadas pelo processo inicial de usinagem e/ou desgaste.

### **2.1. Efeito da Carga**

O dente defletido sobre o efeito de carga estática ou dinâmica, tende a gerar um sinal de vibração no tempo com características de natureza escalonada, isto por causa da flexibilidade variando periodicamente, como a distribuição de carga entre diferentes pares de dentes engrenados, que segundo Randall (1982), esta variação é grande para as engrenagens de dentes retos e mais ainda para as engrenagens de dentes helicoidais.

Diante disto, verifica-se que é possível identificar o efeito da carga a partir do sinal de vibração, estabelecido nas componentes da frequência de engrenamento e suas harmônicas, para cada par de dente engrenado. Deve-se, no entanto, ao se estabelecer a condição de monitoramento, ter o cuidado de se aquistar o sinal para a máquina sobre uma condição de carga constante.

### **2.2. Erros de Usinagem**

Os erros de usinagem podem gerar dois grupos de componentes vibratórias, isto é, aquelas que são iguais para todos os dentes e que surgirão na frequência de engrenamento e suas harmônicas e as que não são iguais para todos os dentes, que estão na categoria das componentes espúrias ou variações aleatórias que normalmente tem níveis de amplitudes baixas no espectro sobre um grande número de harmônicas. As componentes espúrias geralmente estão associadas à falhas periódicas relacionadas a um número diferente de dentes danificados (Randall, 1982).

### **2.3. Desgaste Uniforme**

As componentes de frequências causadas pelo desgaste na engrenagem também já foram devidamente explicadas por Randall (1982). Se o desgaste for considerado uniforme para todos os

dentados, esta falha tenderá a se mostrar nas frequências de engrenamento e suas harmônicas, mas numa amplitude menor que os efeitos devido à deflexão do dente, que acontece nestas mesmas componentes de frequências. Porém um apreciável desgaste pode resultar numa distorção da frequência de engrenamento mais que o efeito da deflexão pela carga e, neste caso, o efeito do desgaste se apresentará mais pronunciado nas altas harmônicas da frequência de engrenamento.

#### **2.4. Efeito da Modulação em Amplitude**

O sinal de vibração de um sistema engrenado, descrito até aqui, é constituído de frequências de engrenamento e suas harmônicas junto com frequências espúrias. Na realidade, a carga sobre o dente varia, e se ela flutua é de se esperar que as amplitudes do sinal também flutuem, ou seja, resultando numa modulação em amplitude. Uma das mais prováveis fontes da modulação é a excentricidade de uma engrenagem, que dará uma modulação em amplitude relacionada à velocidade de rotação (frequência modulante) desta engrenagem em torno da frequência de engrenamento (frequência modulada). As falhas mais localizadas, a exemplo de um dente careado na linha primitiva, tenderão a dar uma modulação de curta duração de tempo, da ordem do período que aquele dente engrena, isto é, uma revolução, gerando no espectro bandas laterais que são de amplitudes uniformes e de baixo nível (Randall, 1982).

#### **2.4. Efeito da Modulação em Frequência**

Em algumas situações em que a velocidade de rotação de uma engrenagem não é constante e que o espaçamento entre os dentes não são perfeitamente uniformes, ocorre a modulação em frequência. Na verdade, quando acontece um aumento da modulação em amplitude devido à variação da pressão de contato entre os dentes, existe simultâneo a isto uma flutuação do torque e, conseqüentemente, da velocidade angular, que por sua vez provoca uma modulação em frequência. A modulação em frequência se apresenta no espectro com um aumento nas amplitudes das famílias das bandas laterais com espaçamento igual à frequência modulante, isto é, a mesma frequência que provoca a modulação em amplitude (Randall, 1982).

#### **2.5. Dentes Danificados**

As principais falhas pontuais que podem vir a estar presente nos dentes de engrenagens são: *pitting*, dentes trincados e dentes quebrados. Estes defeitos causam a perda localizada da rigidez do dente, que causa tanto um aumento na modulação em fase, como em amplitude, durante o período de engrenamento do dente danificado, que por sua vez se reflete no aumento das bandas laterais no espectro. E quando estes defeitos são de grande extensão, acontece uma mudança abrupta da força sobre o dente, que pode vir a excitar algumas frequências de ressonâncias do sistema eixo-mancal (Arato Jr. e Silva, 2001) *apud* McFadden (1992).

### **3. TÉCNICAS DE DETECÇÃO DE FALHAS EM SISTEMAS ENGRENADOS POR ANÁLISE DE VIBRAÇÃO**

Diante das características dos sinais de vibração que ocorrem num sistema engrenado, descritas anteriormente, verifica-se que a análise dos mesmos não é tão simples, pois é composto de diversas componentes que possuem propriedades distintas, e além daquelas pode-se ter falhas transientes, ressonâncias do sistema e características do caminho de transmissão entre o sensor de coleta de dados e a engrenagem. Nestes casos, para que as componentes possam ser devidamente entendidas estas devem ser separadas afim de que se facilite a análise do sinal.

Para se conseguir fazer uma interpretação adequada dos sinais medidos, é necessário o uso de métodos e técnicas, que são selecionadas baseadas nas características do sinal original, de modo que se extraia de um sinal complexo de vibração sujeito a excitações internas e externas, as

componentes relacionadas à falha, afim de que se tenha um diagnóstico confiável e permita fazer um planejamento preditivo.

### 3.1. Métodos de Análise no Domínio do Tempo

- **Indicadores de condição:** Estas técnicas processam o sinal de vibração da engrenagem e retornam um simples valor, indicando o estado de “saúde” do componente. Os índices gerais mais comumente usados são: o valor RMS, valor de Pico, Kurtose e fator K, dado pelo produto do valor RMS pela Kurtose (Silva, 1999). Outros indicadores mais específicos são destacados por James e Limmer (2000), como os valores FMO, FM4 e um híbrido dos dois, o NA4. O valor FMO é a razão do valor de Pico pela soma das médias quadráticas das harmônicas do engrenamento. Já o valor FM4, é uma Kurtose do sinal depois de removidos as harmônicas da frequência de engrenamento e os lóbulos laterais de primeira ordem. O valor NA4 é a Kurtose de sinal, onde são retiradas apenas as frequências relacionadas às harmônicas da frequência de engrenamento, e a Kurtose é calculada para uma variância corrente no tempo.

- **Sinal médio no tempo:** Esta técnica consiste de retirar a média de um grande número de ciclos relacionados à engrenagem que se deseja analisar. Isto permite não apenas retirar os ruídos de fundo, como também algum evento periódico que nada tem a ver com a engrenagem considerada como, por exemplo, a velocidade de rotação da engrenagem. E este processo pode se repetir para todas as outras engrenagens do sistema. Este método pode oferecer a visualização direta de certas falhas, pelo menos àquelas que se tornam grandes, porém apresenta a desvantagem de não detectar falhas como desgaste, cujo efeito aparece nas altas harmônicas da frequência de engrenamento e que são suprimidas pelo processo de média. Em muitas técnicas de processamento de sinais tem sido proposto o uso do sinal médio síncrono, para aumento da qualidade destas técnicas na detecção de falhas em engrenagens (McFadden, 2000), (McFadden, Cook e Forester, 1999).

### 3.2. Métodos de Análise no Domínio da Frequência

- **Espectro de Fourier:** Esta técnica é baseada na aplicação dos conceitos da transformada de Fourier e implementada computacionalmente sob a forma algoritmos FFT. Geralmente a análise espectral consiste em comparar espectros atuais com espectros que caracterize o sistema sem defeito ou de referência. Mas, segundo vários pesquisadores, se torna difícil detectar falhas incipientes pelo espectro puro, pois as falhas em sistemas mecânicos geralmente acontecem em baixas frequências e por isso podem ser facilmente contaminadas por frequências de sinais de outras máquinas e de ruídos de baixa frequência que quase sempre estarão presentes na medida, conforme Lima (1985) e Silva (1999).

Para Lima (1985), que realizou medidas sobre um redutor de velocidade visando realização de manutenção preditiva, os espectros de frequência mostraram lóbulos laterais igualmente espaçados em torno da frequência de engrenamento de uma distância frequencial correspondente à velocidade de rotação da engrenagem em estudo, portanto constatando que a amplitude da frequência de engrenamento e dos lóbulos laterais, bem como a diferença de frequência entre eles, devem ser usados para dar uma indicação de condição do sistema de engrenagens.

- **Cepstrum:** É definido como sendo a transformada inversa de Fourier do logaritmo do módulo do espectro do sinal. Para Randall (1982), o Cepstrum é uma técnica útil para separar bandas laterais mistas, mas que tende a suprimir informações sobre o padrão do espectro, que podem ser importantes no diagnóstico. Este sugere que o Cepstrum seja usado para interpretação adicional do espectro, em lugar de suprimi-lo.

Menegatti e Duarte (1999), fazem uso desta técnica como ferramenta para monitoramento e controle de qualidade de câmbios automotivos, concluindo que a análise Cepstral é confiável na detecção de defeitos em câmbios, principalmente porque esta técnica lhes permitiu a visualização de picos no domínio da quefrência, relacionados às velocidades de rotação dos eixos dos vários câmbios defeituosos.

### 3.3. Métodos de Análise Conjunta Tempo–Frequência

A análise tempo-frequência foi desenvolvida desde os anos 40, e tem sido aplicada nas áreas de processamento e análise de sinais não estacionários, a exemplo do sinal de voz humana. A partir desta aplicação se motivou o desenvolvimento do espectrograma de som usando os conceitos da transformada de Fourier de Curto Tempo (STFT). Em 1932, Wigner apresentou uma distribuição que só veio a ser aplicada por Ville (1948) em seus trabalhos da mecânica quântica, ficando conhecida como a distribuição de Wigner-Ville (WVD).

Atualmente, as distribuições estão sendo desenvolvidas como resultado da escolha de uma função arbitrária chamada “kernel”, que leva a distribuição a atender determinadas restrições. A partir de uma equação geral deduzida por Cohen, foram criadas novas distribuições com propriedades desejáveis, a exemplo das distribuições de Choi-Williams, Zao-Atlas-Marks e Cohen-Posch. Recentemente, também surgiram novas distribuições que se baseiam nos conceitos de famílias de funções afins e, portanto, são lineares, como é o caso da transformada de Wavelets, que permite uma análise multi-resolução (Boashash, 1992).

As principais distribuições tempo-frequência podem ser equacionadas da seguinte forma:

- **Transformada de Fourier de Curto Tempo (STFT):** Matematicamente, este método consiste em fixar um tempo de interesse  $t$  e tornar corrente um tempo  $\tau$ . Para enfatizar o tempo em torno de  $t$ , aplica-se então uma função janela  $h(\tau)$ , que corresponde ao produto  $s(\tau)h(\tau)$ , onde  $h(\tau)$  estará centrada em torno do tempo de interesse  $t - \tau$ , conforme descrita pela equação 1.

$$S_t(f) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{-j2\pi f\tau} s_h(\tau) d\tau = \int_{-\infty}^{\infty} e^{-j2\pi f\tau} s(\tau)h(\tau - t) d\tau \quad (1)$$

Assim para cada tempo diferente, tem-se um espectro, e a coleção do quadrado destes espectros, fornece o espectrograma. Wang e McFadden (1993), aplicaram este método usando uma janela do tipo função Gaussiana, para o sinal médio no tempo e verificaram que este método é uma poderosa ferramenta para detecção de falhas em engrenagens.

- **Distribuição de Wigner-Ville (WVD):** A distribuição de Wigner-Ville é expressa por:

$$W(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{-j2\pi f\tau} s^*(t - \frac{1}{2}\tau) s(t + \frac{1}{2}\tau) d\tau \quad (2)$$

onde  $s^*$  é o conjugado complexo do sinal no tempo  $s(t)$ . Wang e McFadden (1993) avaliaram que a WVD não se mostrou muito eficiente para a detecção de falhas em sistemas engrenados, devido ao sinal ter características multi-componentes, e o surgimento dos termos de interferência originado da bilinearidade desta distribuição, dificultando a interpretação dos mapas tempo-frequência.

- **Distribuição Pseudo-Wigner-Ville (PWVD):** Para a supressão dos termos cruzados na WVD são usados dois métodos. Um que descreve a aplicação de uma janela móvel no domínio do tempo, antes do cálculo da WVD. Outra opção é suavizar a WVD através de uma função móvel no plano tempo-frequência com uma janela exponencial do tipo Gaussiana, conforme proposta por Shin e Jeon (1993):

$$G(t, \omega) = \frac{1}{2\pi\sigma_t\sigma_\omega} e^{-\left[\frac{t^2}{2\sigma_t^2} + \frac{\omega^2}{2\sigma_\omega^2}\right]} \quad (3)$$

Onde  $\sigma_t, \sigma_\omega > 0$  e  $\sigma_t\sigma_\omega \geq 1/2$ , são parâmetros relacionados com as resoluções no tempo e na frequência. Em ambos os casos, obtêm-se a PWVD, que visa reduzir interferências e evitar os valores negativos. Staszewski, Worden e Tomlinson (1997) usaram a PWVD suavizada com uma janela Hamming para o sinal médio no tempo e observaram o aumento da capacidade desta

distribuição em detectar falhas localizadas em engrenagens de dentes retos, pois se tem uma redução significativa das interferências.

#### 4. MODELOS DE SINAIS DE VIBRAÇÃO PARA SISTEMAS ENGRENADOS

Os modelos apresentados neste trabalho são baseados na descrição feita por Arato Jr. e Silva (2001), que consideram um sinal representativo para cada uma das seguintes componentes:

- **Rotação do eixo:** É o tipo da componente que está sempre presente no sinal e que pode ser representada por uma excitação senoidal com frequência igual à rotação do eixo,  $f_r$ . Sendo  $Y_a$  a amplitude, a componente  $Y_g(t)$  é dada pela expressão:

$$Y_g(t) = Y_a \text{sen}(2\pi f_r t) \quad (4)$$

- **Engrenamento:** Esta componente gera para cada par engrenado uma resposta equivalente a uma excitação senoidal cuja frequência é a de engrenamento, dada pelo produto da frequência de rotação do eixo pelo número de dentes da engrenagem,  $f_e = Nf_r$ . O sinal que representa esta componente,  $Y_e(t)$ , com amplitude  $Y_b$  é dado por:

$$Y_e = Y_b \text{sen}(2\pi f_e t) \quad (5)$$

- **Harmônicos do Engrenamento:** O sinal de vibração que representa os desvios relativos do contorno do dente, pode ser dado por  $Y_h(t)$ , onde  $Y_{bn}$  é a amplitude do n-ésimo harmônico,  $n$  representa o número de harmônicos e  $\phi_n$  é o ângulo de fase entre eles:

$$Y_h(t) = \sum_{n=0}^N Y_{bn} \text{sen}(2\pi n f_e t + \phi_n) \quad (6)$$

Na Fig. (1) abaixo, tem-se uma visualização das componentes do sinal descritas acima.

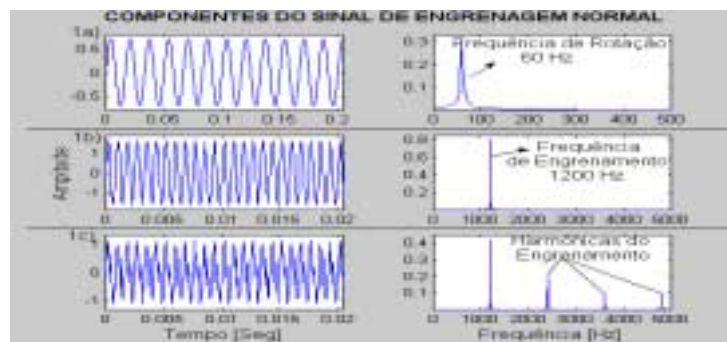


Figura 1. Componentes do sinal de uma engrenagem normal.

Neste caso, foi assumido a frequência de rotação de um eixo girando a 60 Hz, conforme ilustra a Fig. (1a). Na Fig (1b), nota-se a componente de engrenamento  $f_e$ , cujo valor é de 1200 Hz. Na Fig. (1c), observa-se algumas harmônicas relativas à componente de engrenamento.

Além destas componentes normais presentes no sinal de vibração de sistemas engrenados, encontram-se ainda componentes relacionadas à incidência de falhas. Estas podem ser modeladas segundo as expressões abaixo:

- **Eixo desalinhado:** O desalinhamento causa um aumento nas amplitudes das frequências relacionadas à rotação do eixo e nas frequências de engrenamento, principalmente os de segunda e terceira ordem, conforme ilustra a Fig. (2a), obtida de um sinal simulado para frequência de

engrenamento de 1200 Hz e frequência de rotação 60 Hz. Considerando  $Y_{gn}$ , a amplitude do n-ésimo harmônico,  $\phi_n$  a fase entre os harmônicos,  $Y_{b2j}$  a amplitude do j-ésimo harmônico e  $\phi_j$  o ângulo de fase entre os harmônicos, esta componente é dada por:

$$Y_d(t) = \sum_{n=0}^N Y_{gn} \text{sen}(2\pi n f_r t + \phi_n) + \sum_{j=0}^J Y_{b2j} \text{sen}(2\pi j f_e t + \phi_j) \quad (7)$$

- **Excentricidade:** Quando uma engrenagem está funcionando de forma excêntrica, a frequência de engrenamento se apresenta com alta amplitude e cresce o número de bandas laterais ao redor dela e de seus harmônicos, devido à modulação, cujas raias se distanciam entre si da frequência de rotação do eixo, conforme se observa na Fig. (2b). Tomando  $p$  como o número de bandas laterais,  $n$  o número de harmônicas do engrenamento e  $Y_{ap}$  a amplitude da p-ésima banda lateral, o sinal da componente excentricidade é dada por:

$$Y_f(t) = \sum_{n=0}^N Y_{bn} \left[ 1 + \sum_{p=0}^p Y_{ap} \text{sen}(2\pi p f_r t) \right] \text{sen}(2\pi n f_e t + \phi_n) \quad (8)$$

- **Falhas nos dentes da engrenagem:** Estas falhas se refletem no dente diminuindo a sua rigidez, provocando modulação localizada e originando aumento de bandas laterais. Quando este tipo de defeito é muito grande, a tendência é ocorrer mudanças abruptas de força no dente, podendo vir a excitar frequências ressonantes do sistema eixo-mancal, conforme descrito por McFadden (1992) *apud* Arato Jr. e Silva (2001). A Fig. (2c) ilustra um sinal simulado com estas características, para uma frequência ressonante de 2500 Hz. Esta pode ser equacionada por uma série de impulsos de mesma amplitude, com período de repetição  $T_r = 1/f_r$ , que multiplicada por pulsos amortecidos exponencialmente, apresenta uma resposta definida por  $\text{Im } p(t)$ . Este sinal multiplicado por uma senoíde que representa a frequência de ressonância do sistema eixo-mancal  $\Omega$ , fica modulado por uma frequência igual à velocidade de rotação do eixo da engrenagem com falha, que pode ser representado por:

$$Y_p(t) = \text{Imp}(t) \cdot [Y_{\Omega} \text{sen}(2\pi \Omega t)] \quad (9)$$

Finalmente, considerando o sinal mais complexo, contendo todas as componentes equacionadas anteriormente, o sinal de vibração de um par engrenado, pode ser dado por:

$$Y_t(t) = Y_g(t) + Y_e(t) + Y_h(t) + Y_d(t) + Y_f(t) + Y_p(t) \quad (10)$$

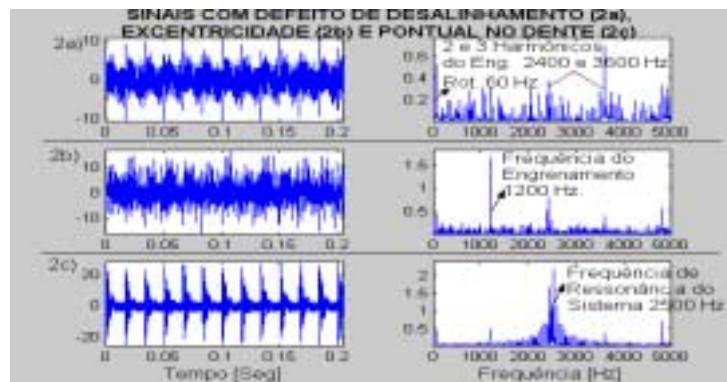


Figura 2. Sinais simulando defeitos de desalinhamento, excentricidade e falha pontual no dente de uma engrenagem.

## 5. APLICAÇÃO DAS REPRESENTAÇÕES TEMPO-FREQÜÊNCIA A SINAIS SIMULADOS E INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS

Neste tópicos se fará uma análise de dois métodos tempo-freqüência, espectrograma (STFT) e distribuição Pseudo Wigner-Ville (PWVD), aplicados no ambiente MatLab, para sinais simulando falhas de desalinhamento, excentricidade e dente com falha localizada. Os sinais foram gerados com 2048 pontos, para uma freqüência de amostragem de 5000 Hz, e será composto das componentes descritas pelas equações 4 à 10. O objetivo desta etapa do trabalho é averiguar qual das distribuições permite melhor identificação de falhas para os sinais com defeitos de desalinhamento, excentricidade e pontual.

As Figs. (3) a (6) mostram os espectrogramas (STFT) do sinal sem defeito e dos três sinais com defeito. As Figs (7) a (10) mostram a distribuição Pseudo Wigner-Ville (PWVD), aplicada para os mesmos sinais simulados anteriormente.

Analisando os mapas das Figs (3) e (7), observa-se que o sinal é constituído da freqüência de engrenamento (1200 Hz) e de seus harmônicos (2400, 3600 e 4800 Hz), bem como da freqüência de rotação (60 Hz), não muito visível devido à baixa resolução frequencial em ambos os mapas.

As Figs (4) e (8), representam o sinal de engrenagem com defeito de desalinhamento, cuja característica principal é a freqüência dos harmônicos dominante em relação à própria freqüência de engrenamento, representados por *spots* igualmente espaçados no eixo do tempo de aproximadamente 0.0167 s, relativos à freqüência de rotação do eixo (60 Hz).

As Figs. (5) e (9) representam o sinal contendo o defeito de excentricidade na engrenagem. Observa-se, a dominância de energia em torno da freqüência de engrenamento (1200 Hz), e ainda de forma menos visível, em alguns harmônicos desta freqüência.

Já nas Figs. (6) e (10), representando o sinal com falha localizada no dente, observam-se *spots* em torno da freqüência de 2500 Hz, como sendo uma freqüência de ressonância do sistema, além de permitir visualizar os impactos igualmente espaçados no eixo do tempo de aproximadamente 0.0167 s, relativos à freqüência de rotação do eixo (60 Hz), e que diminuem de energia à medida que vão se distanciando da freqüência de 2500 Hz.

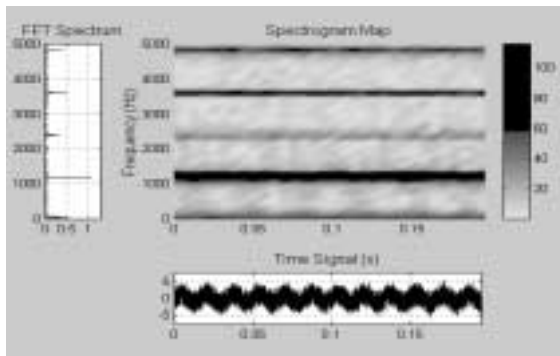


Figura 3. Espectrograma do sinal sem defeito.

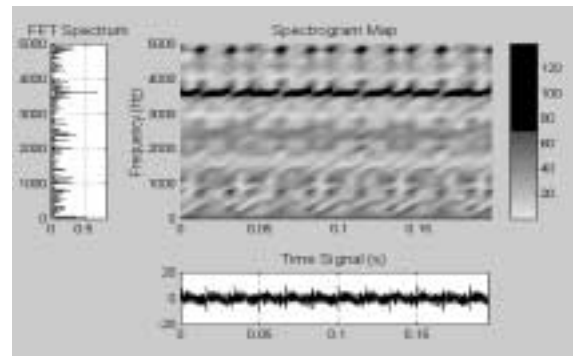


Figura 4. Espectrograma do desalinhamento.

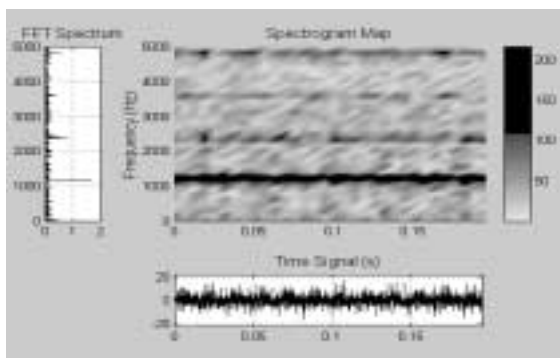


Figura 5. Espectrograma de excentricidade.

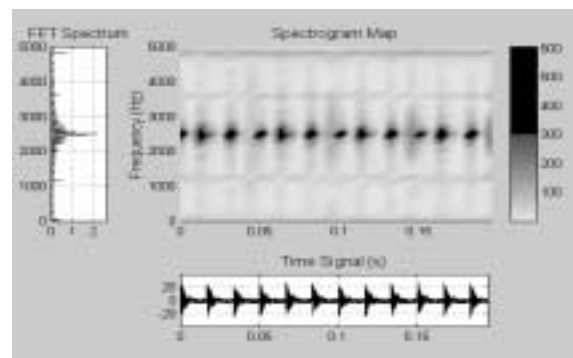


Figura 6. Espectrograma de falha pontual.



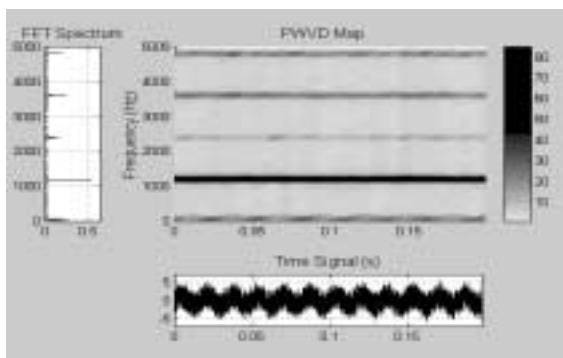


Figura 7. PWVD do sinal sem defeito.

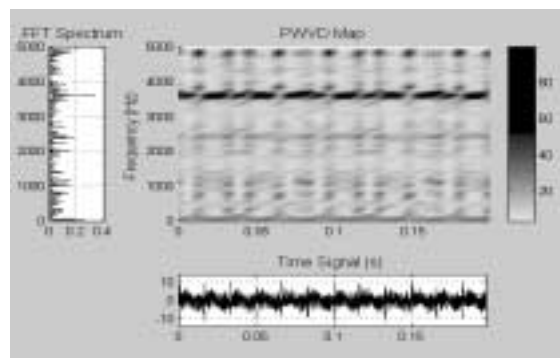


Figura 8. PWVD do desalinhamento.

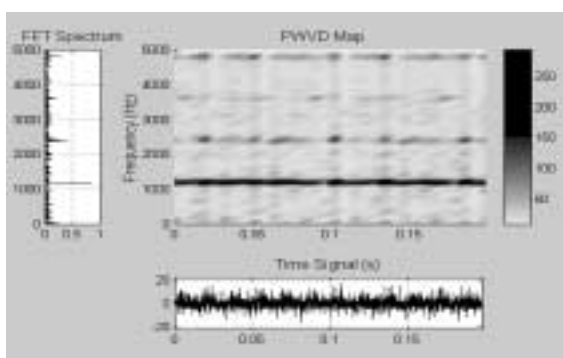


Figura 9. PWVD de excentricidade.

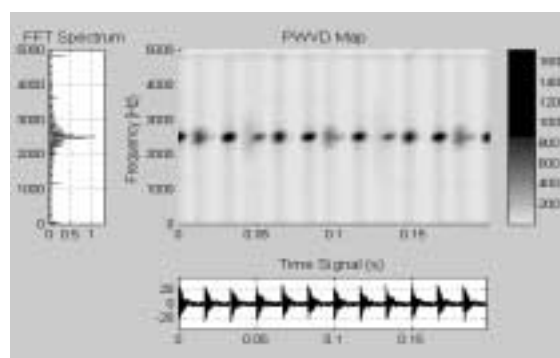


Figura 10. PWVD de Falha pontual.

Comparando-se as duas representações, observa-se que em geral os mapas PWVD apresentaram uma melhor resolução que os mapas STFT, mostrando componentes de forma mais definidas e permitindo uma melhor interpretação dos fenômenos envolvidos.

## 6. CONCLUSÕES

Neste trabalho, as distribuições STFT e PWVD foram aplicadas para alguns tipos de sinais simulando falhas em sistemas engrenados, podendo-se constatar que ambas permitiram identificar as principais componentes características de defeitos (frequências de rotação, engrenamento e harmônicas), embora a resolução frequencial tenha sido um pouco afetada. Diante dos mapas visualizados, observou-se a vantagem da distribuição pseudo Wigner–Ville (PWVD) sobre o espectrograma (STFT), pois oferece melhor resolução tempo-frequência. Mesmo assim, para fins de interpretação de um sinal de vibração medido num sistema engrenado, considera-se que ambas as representações devam ser usadas.

## 6. AGRADECIMENTOS

À CAPES pelo apoio financeiro concedido na forma de bolsa de Demanda Social, e a infraestrutura disponível do Laboratório de Vibração e Instrumentação do DEM/CCT/UFPB.

## 7. REFERÊNCIAS

- Boashash, B., 1992, “Time-Frequency Signal Analysis: Methods and Applications”, Parte I – Fundamentals, John Wiley & Sons, New York, 547 p.
- Li, C. J. and Limmer, J. D., 2000, “Model-based condition index for tracking gear wear and fatigue damage”, WEAR, Elsevier Science, Vol. 241, pp 26-32.

- Arato Jr., A. e Silva, D. G., 2001, “Análise estatística de sinais vibratórios na detecção de falhas em sistemas de engrenamento sujeitos a variação de potência”, Anais do XVI Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica – COBEM 2001, Uberlândia - MG.
- Lima, N. N. C., 1985, “Manutenção Preditiva: Um estudo sobre detecção de falhas em engrenagens através de medições e análises de sinais de vibração”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis – SC.
- McFadden, P. D., Cook, J. G. and Forester, L. M., 1999, “Decomposition of gear vibration signals by the generalized S transform”, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 5, p. 691-707.
- McFadden, P. D., 2000, “Detection of gear faults by decomposition of matched differences of vibration signals”, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 14, p. 805-817.
- Menegatti, W. B. e Duarte, M. A. V., 1999, “Identificação de falhas em engrenagens de câmbios”, Anais do XV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica – COBEM 1999, Águas de Lindóia - SP.
- Randall, R. B., 1982, “A new method of modeling gear faults”, Journal of Mechanical Design, Vol. 104, p. 259-267.
- Silva, A. A., 1999, “Detecção e Análise Dinâmica de Falhas em Rolamentos”, Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, EESC-USP, São Carlos - SP.
- Staszewski, W. J., Worden, K. and Tomlinson, G. R., 1997, “Time-Frequency analysis in gearbox fault detection using the Wigner-Ville distribution and pattern recognition”, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 11, p. 673-692.
- Wang, W. J. and McFadden, P. D., 1993, “Early detection of gear failure by vibration analysis - II. Interpretation of the time-frequency distribution using image processing techniques”, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 7, p. 205-215.

## **COMPARISON OF JOINT TIME-FREQUENCY REPRESENTATIONS APPLIED IN THE FAULT ANALYSIS IN GEARED SYSTEMS**

**Abstract.** *To knowledge of the faults development phenomenon in geared systems has been seen as an important task in the design and maintenance phases. Usually, the vibrations signals of these systems are multi-components and not stationary due to the transient gear forces that appears starting from the superficial contact between the teeth with some type of imperfection, wear, fatigue crack, etc. developed in the form of vibrations that excite several resonance frequencies of the system. The classic spectral analysis applied to the fault detection present limitations, especially concerning the appearance of spurious components that can contaminate the spectrum, and difficult the interpretation of the analysts.*

*The objective of this work is to make a bibliographic revision about the joint time-frequency representations applied to the fault analysis in geared systems, and investigate studies related to the generation of signals that simulate several operation conditions in the dynamic aspect, and after to apply some representations time-frequency in these models, as the spectrogram and pseudo Wigner-Ville distribution. Based in the signals analysis simulating some conditions of typical faults, it will be possible to compare the sensibility of these methods and indicate a more appropriate tool to fault detection and diagnosis in these systems.*

**Keywords:** *Time-frequency methods, Fault Analysis, Vibration signals, Geared systems.*