

INFLUÊNCIA DA RESOLUÇÃO TEMPO-FREQÜÊNCIA DA WAVELET DE MORLET NO DIAGNÓSTICO DE FALHAS DE MÁQUINAS ROTATIVAS

Darley Fiácrio de Arruda Santiago^{*} e Robson Pederiva⁺

^{*} UNICAMP / Universidade Estadual de Campinas - Faculdade de Engenharia Mecânica
CEFET-PI / Centro Federal de Educação Tecnológica do Piauí
Caixa Postal: 6051, Campinas, São Paulo, Brazil, Cep: 13083-970
E-mail: darley@fem.unicamp.br, darleyarruda@bol.com.br

⁺ UNICAMP / Universidade Estadual de Campinas - Faculdade de Engenharia Mecânica
Caixa Postal: 6051, Campinas, São Paulo, Brazil, Cep: 13083-970
E-mail: robson@fem.unicamp.br, web page: <http://www.fem.unicamp.br>

Palavras chave: Wavelet de Morlet, Diagnóstico de Falhas, Máquinas Rotativas.

Resumo. *Existem vários métodos convencionais para detecção e diagnóstico de falhas em máquinas rotativas. Estes métodos podem ser no domínio do tempo ou no domínio da frequência. Entretanto, eles tornam-se ineficientes quando aplicado na análise de sinais de natureza não-estacionária. A limitação desses métodos na análise de sinais não-estacionários possibilitou o desenvolvimento de técnicas de processamento de sinais como tempo-frequência (Transformada de Gabor, Wigner-Ville, etc.) e tempo-escala (Transformada de Wavelet). A Transformada de Wavelet (WT) é uma ferramenta efetiva para o processamento de sinais estacionários e não-estacionários. Este trabalho mostra a eficiência de aplicação da análise de wavelet no diagnóstico de falhas mecânicas introduzidas numa bancada experimental de testes. Para isto, faz-se um estudo comparativo entre duas funções wavelet de Morlet e os resultados mostram que o parâmetro que controla sua resolução tempo-frequência deve ser cuidadosamente selecionado. A wavelet de Morlet proposta apresenta boa resolução no tempo e frequência e a wavelet de Morlet do Matlab apresenta somente boa resolução no tempo. Vantagens e desvantagens relacionadas à implementação computacional da função wavelet proposta são discutidos, bem como algumas aplicações usando sinais reais e simulados são apresentadas.*

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, o crescimento da competitividade e os novos desafios de produtividade entre as indústrias, têm exigido máquinas complexas e sofisticadas, por isso o sistema de monitoramento da condição dessas máquinas tem se tornado muito importante. Um sistema confiável de monitoramento da condição proporciona redução no número de falhas e de intervenções não planejadas da manutenção, bem como diminuição do tempo de parada das máquinas. Estas razões têm possibilitado o surgimento e o desenvolvimento rápido de novas técnicas ou métodos de diagnóstico de falhas mecânicas. Existem muitos métodos convencionais para detecção e diagnóstico de falhas. Baseados na representação de um sinal durante seu processamento, estes métodos podem ser, em geral, no domínio do tempo ou no domínio da frequência.

Os métodos no domínio do tempo são geralmente sensíveis a falhas de natureza impulsiva. Parâmetros contidos nos sinais com defeitos que estão sendo monitorados podem ser extraídos das máquinas por esses métodos. Dentre os principais métodos no domínio do tempo, podemos citar: Valor de R.M.S., Valor de pico, Fator de Crista, Kurtosis, etc. Estes parâmetros, uma vez caracterizados, frequentemente fornecem diagnósticos satisfatórios. Contudo, se estes defeitos tem comportamento complexo, por exemplo, não-estacionário ou transiente, os métodos no domínio no tempo não são confiáveis o suficiente para diagnosticá-los.

Os métodos no domínio da frequência assumem que os sinais que estão sendo analisados tenham componentes com características periódicas. Assim, um defeito produz um sinal periódico na frequência característica do defeito. Exemplos de métodos no domínio em frequência incluem Análise Espectral, Análise Cepstral, Análise de Envelope. Dentre eles, a análise espectral tem sido largamente aceito como sendo o método mais confiável de diagnóstico de falhas. Uma das principais limitações da análise espectral é na análise de sinais transientes. Embora este sinal tenha uma participação no espectro de frequência, sua localização no eixo do tempo é perdida.

Em muitas indústrias, o monitoramento da condição de máquinas e o diagnóstico de falhas mecânicas tornam-se muito difíceis devido a grande quantidade de equipamentos mecânicos que operam de modos variados e que têm comportamentos dinâmicos não-estacionários. Exemplos de comportamentos dinâmicos não-estacionários são, choque, trinca, folga mecânica, deslizamento, atrito, etc. Para processar estes sinais que variam no tempo, ou seja, sinais cujo conteúdo espectral depende do tempo, precisa-se uma técnica que represente os mesmos simultaneamente no domínio do tempo e frequência. Embora, a Transformada de Fourier (FT) seja um método efetivo e largamente utilizado em processamento de sinais e diagnóstico de falhas, ele é mais adequado para sinais de natureza estacionária. A limitação da Transformada de Fourier em analisar sinais não-estacionários levou o desenvolvimento de técnicas de processamento de sinais como tempo-frequência (Transformada de Gabor, Wigner-Ville, etc.) e tempo-escala (Transformada de Wavelet). A Transformada de Wavelet (WT) é uma nova ferramenta efetiva para o processamento de sinais estacionários e não-estacionários. A Transformada de Wavelet tem despertado o interesse de muitos pesquisadores nos últimos anos, por ser uma ferramenta que quando utilizada em conjunção

com técnicas de inteligência artificial (Redes Neurais, Lógica Fuzzy, Sistemas Especialistas, etc.) possibilitam o monitoramento on-line da manutenção preditiva visando a minimização do tempo entre o recebimento das informações e o diagnóstico do problema^{1,2,3,4}.

Este trabalho mostra a eficiência de aplicação da análise de wavelet no diagnóstico de falhas mecânicas introduzidas numa bancada experimental de testes. Para isto, faz-se um estudo comparativo entre duas funções wavelet de Morlet e os resultados mostram que o parâmetro que controla sua resolução tempo-freqüência deve ser cuidadosamente selecionado. A wavelet de Morlet proposta apresenta boa resolução no tempo e freqüência e a wavelet de Morlet do Matlab apresenta somente boa resolução no tempo. Vantagens e desvantagens relacionadas à implementação computacional da função wavelet proposta são discutidos, bem como algumas aplicações usando sinais reais e simulados são apresentadas.

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS DA TRANSFORMADA DE WAVELET

Para sinais estacionários (cujas propriedades não variam com o tempo), a análise espectral ou transformada de Fourier (FT) é extremamente útil porque a freqüência contida no sinal é de grande importância. A análise de Fourier tem sérias desvantagens. Uma delas é que na transformação para o domínio da freqüência, existe perda de informação no tempo.

A Transformada de Fourier para um sinal estacionário $x(t)$ é dada pela seguinte expressão:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \cdot e^{-i2\pi ft} dt \quad (1)$$

A análise dos coeficientes $X(f)$ define a freqüência global f do sinal $x(t)$. Por outro lado, muitos sinais têm natureza não-estacionária ou transiente: impulsos, choques, mudanças bruscas, início e fim de eventos, etc. Estes sinais possuem características que são freqüentemente a parte mais importante do sinal, e a transformada de Fourier não é adequada para detectá-las^{5,6}. Num esforço para corrigir esta deficiência, Dennis Gabor em 1946 foi quem primeiro adaptou a transformada de Fourier para analisar somente uma pequena seção do sinal no tempo. Essa técnica de janelamento do sinal é conhecida como Transformada de Fourier de Curta Duração (STFT). Matematicamente, a STFT pode ser definida como uma transformada de Fourier com janela e é função da freqüência f e posição b :

$$F(f, b) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) g(t-b) e^{-i2\pi ft} dt \quad (2)$$

onde, $g(t)$ é uma função janela do sinal $x(t)$ cuja posição é transladada no tempo por b . A STFT transforma um sinal no domínio do tempo em uma função bidimensional no domínio tempo-freqüência (f, b) , a qual pode ser representada através de um espectograma.

Existem algumas limitações associadas a STFT, uma delas diz respeito à largura da janela, cujo valor é constante para todas as freqüências. É óbvio que uma janela larga (maior número

de amostras) dá uma boa resolução no domínio da frequência, mas resolução pobre no domínio do tempo, e vice versa. Então, com a STFT não é possível obter uma boa resolução no domínio do tempo e da frequência. Em situações práticas, chega-se a um acordo entre as duas resoluções, ou seja, escolhe-se uma janela que possibilite a obtenção de informações no domínio do tempo e frequência. Essas informações tem precisão limitada devido a largura da janela ⁷. A transformada de Fourier de curta duração introduz uma escala e analisa o sinal do ponto de vista dessa escala (a escala é dada pela largura da janela). Se o sinal possui detalhes importantes fora dessa escala, tem-se problemas na análise.

Para resolver esse problema da transformada de Fourier de curta duração, deve-se definir uma transformada que seja independente da escala. Essa transformada não deve usar uma escala fixa na análise, mas sim variar a escala para evitar compromisso com uma escala específica. Essa transformada é conhecida como Transformada de Wavelet (WT). Ela possibilita que um sinal seja analisado com boa resolução no tempo ou frequência.

A Transformada de Wavelet (WT) representa um avanço em relação a STFT, pois ela é uma técnica que usa escalas variáveis. A análise por wavelet permite o uso de uma escala menor quando se deseja maior resolução da informação contida no sinal em alta frequência, e uma escala maior quando se deseja maior resolução da informação contida no sinal em baixa frequência. As quantidades frequência e escala são inversamente relacionadas, isto é, uma escala menor implica uma alta frequência e vice-versa.

A noção de escala na WT foi introduzida como alternativa para frequência, levando-a a uma decomposição tempo-escala. Isto significa que um sinal pode ser mapeado num plano tempo-escala, através de um escalograma. Isto é equivalente ao mapeamento tempo-frequência, através de um espectrograma, usado na STFT. De fato, existe uma correspondência entre escala e frequência e a Transformada de Wavelet pode ser considerada como sendo uma representação em tempo-frequência ⁸.

A Transformada Contínua de Wavelet (CWT) do sinal $x(t)$ é definida por:

$$CWT(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \cdot \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (3)$$

onde $\psi(t)$ é a wavelet mãe, $\psi^*(t)$ o conjugado complexo de $\psi(t)$ e $\psi_{a,b}(t) = 1/\sqrt{a} \psi(t - b/a)$ são as wavelets filhas. O parâmetro a chamado de escala escalona uma função por compressão ou dilatação; b é o mesmo da STFT chamado de coeficiente de translação, ele simplesmente avança ou atrasa a posição da wavelet no eixo do tempo. A diferença básica entre a STFT e a CWT é que na CWT usa-se uma escala a variável, ao invés de uma frequência f variável na STFT. Matematicamente atrasar uma função $f(t)$ de t_d , significa representá-la por $f(t - t_d)$. O fator $1/\sqrt{a}$ utilizado na expressão (3) é usado para garantir que a energia das wavelets escalonada e transladada sejam as mesmas da wavelet mãe ⁹. Os valores $CWT(a, b)$ da Transformada Contínua de Wavelet são chamados de

coeficientes da wavelet, os quais são função da escala e posição ¹⁰. A Wavelet é uma onda pequena com duração limitada e que tem valor médio igual a zero ¹¹.

Em particular, a Transformada de Wavelet (WT) é adequada para análise de sinais estacionários, não-estacionários ou transientes, porque ela introduz o conceito de escala como alternativa para frequência utilizada pela transformada de Fourier de curta duração (STFT) ou Transformada de Gabor. Portanto, a análise e processamento de sinais por wavelets possibilitam a obtenção imediata de informações em relação a outras técnicas de análise em tempo-frequência ¹².

Neste trabalho, faz-se um estudo da aplicação da transformada de wavelet comparando duas funções wavelets de Morlet. A primeira função wavelet de Morlet é disponibilizada no toolbox do Matlab ¹¹, e a segunda, é uma função wavelet de Morlet proposta, a qual foi implementada computacionalmente.

As funções wavelets de Morlet do Matlab e Proposta são dadas, respectivamente, por:

$$\psi(t) = e^{-t^2/2} \cos(5t) \quad (4)$$

$$\psi(t) = ce^{-\sigma^2 t^2} e^{iw_0 t} \quad (5)$$

onde $c = \sqrt{\sigma}/\pi$ e w_0 são constantes. Maiores detalhes sobre a relação entre escala e frequência podem ser encontrados em ¹³. As Figuras 1(a) e 1(b), mostram as duas wavelets de Morlet utilizadas neste trabalho. Os valores de σ e de w_0 usados na expressão (5) para wavelet proposta foi de 0.3 e de 6 rad/s, respectivamente.

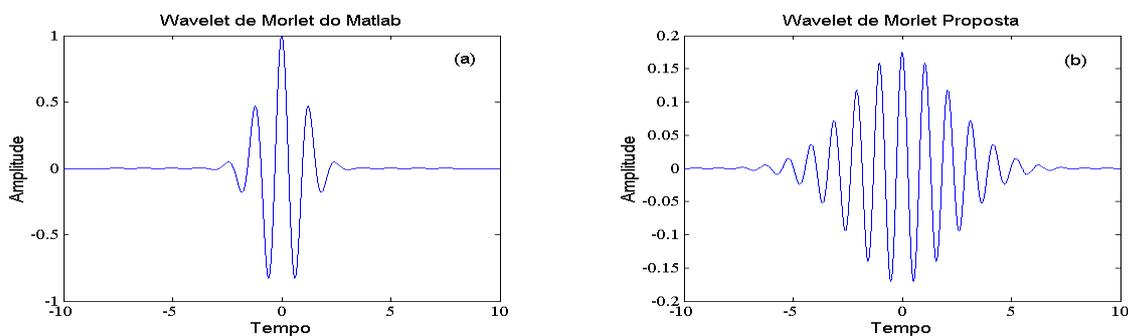


Figura 1: (a) Wavelet de Morlet do Matlab e (b) Wavelet de Morlet Proposta.

O parâmetro σ controla a resolução no domínio do tempo e da frequência da wavelet de Morlet. Diminuindo-se σ aumenta-se a resolução em frequência e diminui-se a resolução no tempo e vice-versa. Assim sendo, existe sempre um σ ótimo que possibilita uma melhor resolução no mapa tempo-frequência. Por isso, o valor de σ deve ser cuidadosamente selecionado. Segundo ^{14,15}, o parâmetro σ pode ser selecionado de acordo com o critério da entropia mínima de Shannon, dado pela fórmula $E(s) = -\sum_i s_i \log(s_i)$, onde s é o sinal e s_i é a amostra do sinal no instante i . Neste trabalho, adotou-se este critério de seleção para os

valores de σ usados durante a fase de aplicação da CWT.

Semelhante a CWT de Morlet disponibilizada no toolbox de wavelet do Matlab, a CWT de Morlet proposta é obtida a partir da implementação computacional da expressão (3), cujo resultado é a obtenção da seguinte matriz complexa de coeficientes no plano tempo-frequência:

$$W_f(f, b) = F^{-1}\{X(f)\psi^*(f)\}, \quad (6)$$

onde, $X(f)$ e $\psi(f)$ são as transformadas de Fourier de $x(t)$ e $\psi(t)$, respectivamente, e F^{-1} denota a transformada inversa de Fourier. Para implementação da expressão (3), usa-se um sinal discreto da forma $x(j) = 1, \dots, M$, onde M é o número de amostras do sinal. Assim sendo, a expressão (6) pode ser reescrita como ¹⁵:

$$W(i, j) = F^{-1}\{X(f)\psi^*(f)\} \quad (7)$$

onde, cada linha da matriz representa uma frequência específica e cada coluna uma amostra diferente do tempo de aquisição do sinal. Então, pode-se definir uma outra matriz C_f dada pela expressão (8), a qual é constituída basicamente pela magnitude dos coeficientes da matriz W :

$$C_f(i, j) = |W(i, j)| \quad (8)$$

A implementação gráfica da matriz C_f forma uma figura tridimensional mostrando a distribuição de energia do sinal ao longo da frequência e do tempo; onde, altos valores dos coeficientes de C_f são, principalmente, causados por picos relacionados a fenômenos estacionários e não-estacionários (transientes, impulsos, etc.) contidos no sinal. Baseado nisto, pode-se construir uma nova matriz $C_{f_{\max}}$ de coeficientes, retendo somente os valores máximos de cada coluna da matriz C_f . Assim sendo,

$$C_{f_{\max}}(j) = \max(C_f(i, j)), \quad i = 1, \dots, N, \quad j = 1, \dots, M. \quad (9)$$

A idéia básica de utilizar a matriz $C_{f_{\max}}$ é que informações contidas no sinal, tais como frequências de excitação específica e/ou impulsos gerem valores de pico, os quais conseqüentemente vão aparecer em um número menor de colunas, quando comparados com a matriz C_f . Os coeficientes máximos retidos em cada coluna correspondem ao instante de tempo onde o fenômeno ocorreu. Por outro lado, esses valores de pico retidos em cada linha correspondem a frequências específicas excitada por fenômenos estacionários e não-estacionários.

Estes aspectos são muito importantes, primeiro, no monitoramento das vibrações de sistemas mecânicos, pois pode-se quantificar os valores máximos de energia contidos no sinal de forma compacta e relacioná-los a freqüência do defeito ou a presença de impulsos; segundo, em tarefas de reconhecimento de padrões com aplicações em redes neurais.

3 APLICAÇÃO NUMÉRICA

A seguir, faz-se uma aplicação da transformada contínua de wavelet comparando duas funções wavelets de Morlet do Matlab e Proposta. Para isto, utilizam-se dois sinais simulados, o primeiro, mostrado na Figura 2(a) possui características estacionárias; e o segundo, mostrado na Figura 2(b) possui características estacionárias e não-estacionárias.

As expressões matemáticas do primeiro e do segundo sinal são dadas, respectivamente, pelas expressões (10) e (11).

$$s_1(t) = \text{sen}(2\pi 20t) + \text{sen}(2\pi 24t) + 2\text{sen}(2\pi 40t) \quad (10)$$

$$s_2(t) = \cos(2\pi 100(t - 0.3)) e^{(-200\pi(t-0.3)^2/2)} + \text{sen}(2\pi 200t) \quad (11)$$

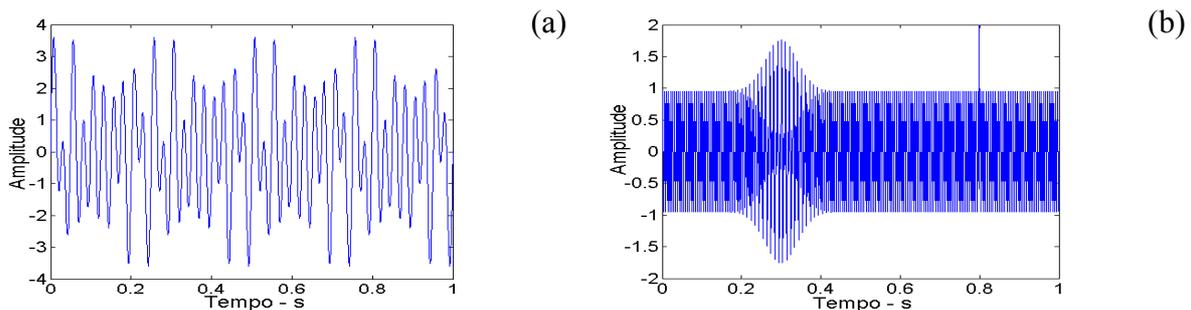


Figura 2: (a) Sinal Estacionário e (b) Sinal Estacionário e Não-estacionário.

As Figuras 3(a) e 3(b) mostram uma comparação entre as distribuições tempo-freqüência para o sinal estacionário usando a wavelet de Morlet proposta e a wavelet de Morlet do Matlab, respectivamente. Os resultados mostram como a escolha adequada do parâmetro σ influencia na resolução tempo-freqüência, bem como na interpretação das informações contidas no sinal.

A Figura 3(a) mostra claramente as freqüências de 20, 24 e 40 Hz. Isto se deve a boa resolução em freqüência obtida a partir escolha adequada de σ com a wavelet proposta. Por outro lado, a Figura 3(b) mostra a freqüência de 40 Hz, porém com baixa resolução em freqüência, e as freqüências de 20 e 24 Hz aparecem de forma confusa e ambígua, ou seja, é como se ambas fossem de mesmo valor; isto é mostrado mais claramente nas Figuras 4(a) e 4(b), onde se tem uma vista lateral do mapa da wavelet em freqüência. Estas figuras foram obtidas a partir da expressão (9). Observa-se também na Figura 3(b), que a distribuição de energia dessas freqüências acontece de forma descontínua. Isto não se observa no espectrograma da Figura 3(a), embora as freqüências de 20 e 24 Hz estejam bem próximas,

elas são mostradas claramente e suas distribuições de energia aparecem de forma contínua ao longo de todo tempo.

Observando-se as Figuras (3) e (4), conclui-se que a boa resolução em frequência da wavelet de Morlet proposta possibilita uma melhor análise das informações contidas no sinal estacionário, bem como de sua distribuição de energia em função da frequência e do tempo. O valor selecionado de σ para este sinal foi de 0.2.

As Figuras 5(a) e 5(b) mostram uma comparação entre as distribuições tempo-frequência para o sinal não-estacionário usando a wavelet de Morlet proposta e a wavelet de Morlet do Matlab. Novamente, observam-se claramente na Fig. 5(a) as informações estacionárias e não-estacionárias contidas no sinal, enquanto que na Fig. 5(b) essas informações não são mostradas claramente, devido a baixa resolução em frequência da wavelet de Morlet usada no Matlab. Isto é mostrado mais claramente nas Figuras 6(a) e 6(b), comparando suas wavelets em frequência. Uma grande vantagem da wavelet de Morlet do Matlab ⁸ é a sua capacidade de localização no tempo (boa resolução no tempo) de informações não-estacionárias contidas no sinal, como mostra a Figura 6(b). O valor selecionado de σ para este sinal foi de 0.6.

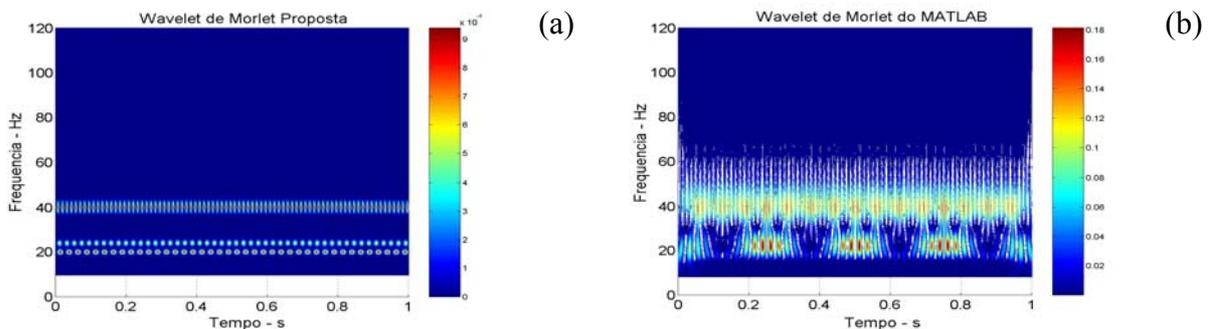


Figura 3: Espectrogramas do Sinal Estacionário; (a) Wavelet Proposta e (b) Wavelet do Matlab

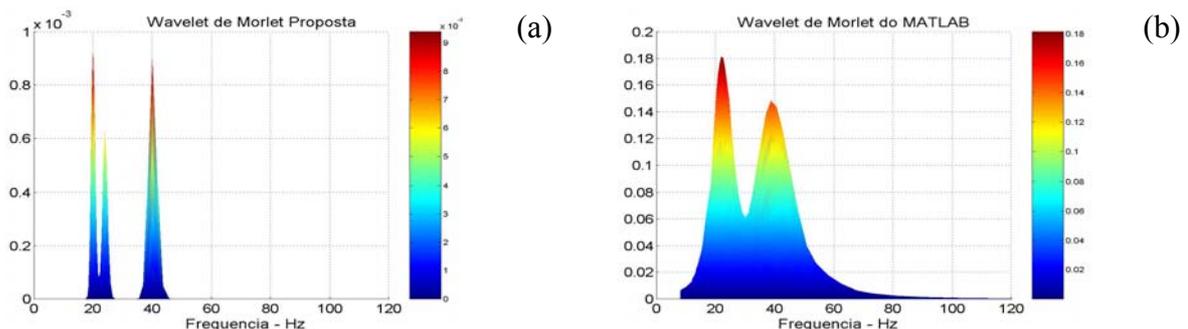


Figura 4: Wavelet em Frequência do Sinal Estacionário; (a) Wavelet Proposta e (b) Wavelet do Matlab

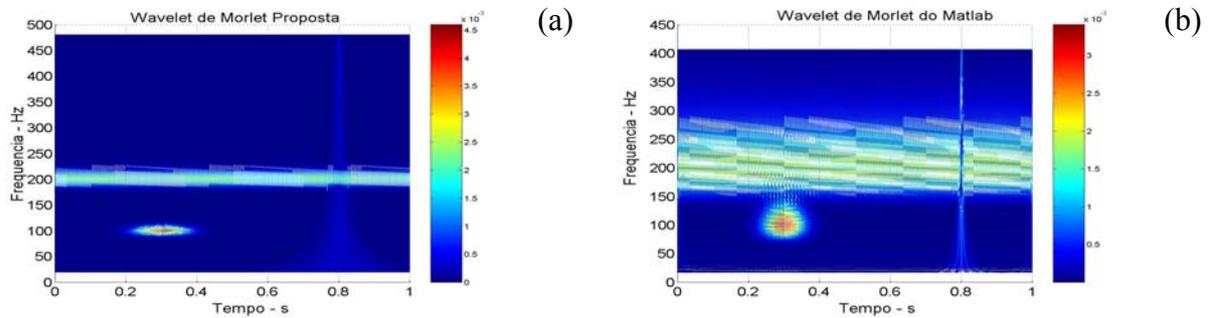


Figura 5: Espectrogramas do Sinal Não-estacionário; (a) Wavelet Proposta e (b) Wavelet do Matlab

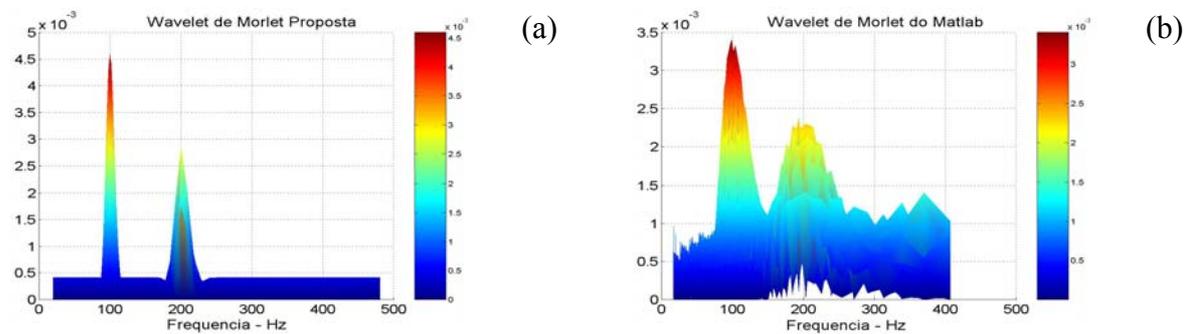


Figura 6: Wavelet em Frequência do Sinal Não-estacionário; (a) Wavelet Proposta e (b) Wavelet do Matlab

4 APLICAÇÃO EXPERIMENTAL

Nesta seção, mostra-se uma aplicação da metodologia desenvolvida na seção 2, no diagnóstico de falhas introduzidas numa máquina rotativa. Utilizou-se para realização deste trabalho, a bancada experimental de testes mostrada na Figura (7). Foram introduzidas na bancada as falhas de desbalanceamento e desbalanceamento + desalinhamento paralelo.



Figura 7 – Bancada Experimental de Testes

A bancada consiste de um motor elétrico de 3 CV, dois rotores fixados a um eixo e suportado em ambas as extremidades por dois mancais de rolamentos idênticos. O conjunto eixo-rotor-mancais é ligado ao eixo do motor através de um acoplamento flexível. As falhas

foram introduzidas na bancada de testes separadamente, e, em seguida foram feitas as aquisições dos sinais de vibrações (deslocamento) utilizando um sensor de proximidade posicionado na direção vertical e nas vizinhanças do primeiro rotor (próximo ao motor elétrico). A seguir, descrevem-se algumas características particulares de cada tipo de falha, bem como mostram-se na Fig. (8) seus respectivos espectros. O desbalanceamento foi introduzido na bancada de testes fixando uma massa de 2 gramas em um ponto qualquer situado na extremidade do rotor. O desalinhamento foi introduzido a partir de um desalinhamento paralelo entre o eixo-motor e eixo-rotor, colocando-se uma chapa de 1 mm de espessura na base do mancal.

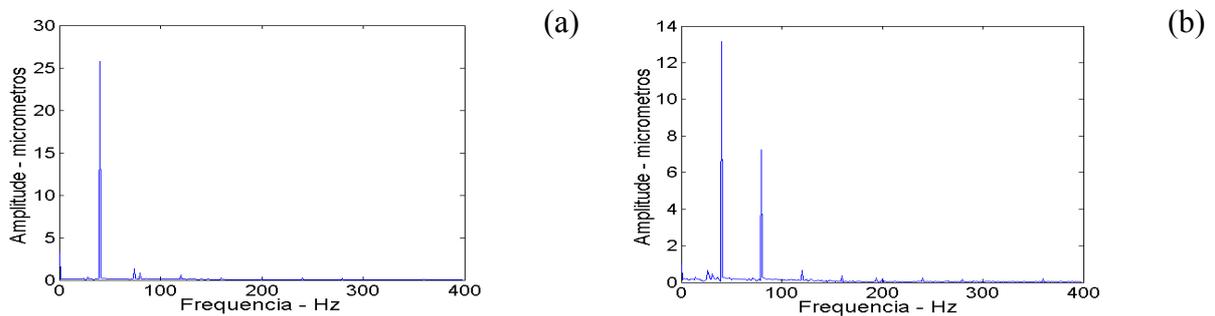


Figura 8 – Espectros; (a) Desbalanceamento (b) Desbalanceamento + Desalinhamento Paralelo.

A seguir, é mostrada uma comparação entre as distribuições tempo-freqüência para as condições de falhas introduzidas na bancada usando a wavelet de Morlet proposta e a wavelet do Matlab. O valor selecionado de σ para essas aplicações foi de 0.1. A freqüência de rotação da máquina é de 40 Hz (1X). As freqüências harmônicas da rotação são iguais a 2X (80 Hz), 3X (120 Hz), 4X (160 Hz), etc. A Figura 9(a) mostra para a condição com desbalanceamento a componente 1X existindo durante todo tempo com bastante energia. Por outro lado, observa-se na Figura 9(b) a componente 1X existindo durante todo tempo, porém com baixa resolução em freqüência.

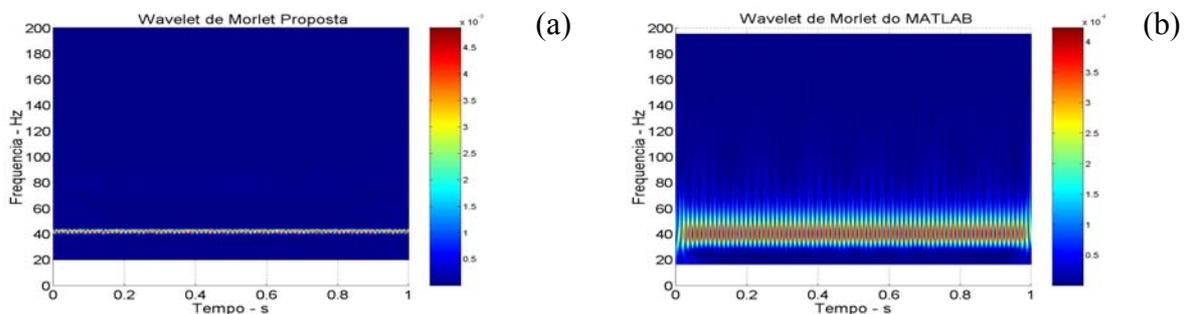


Figura 9: Espectrogramas do Desbalanceamento; (a) Wavelet Proposta e (b) Wavelet do Matlab

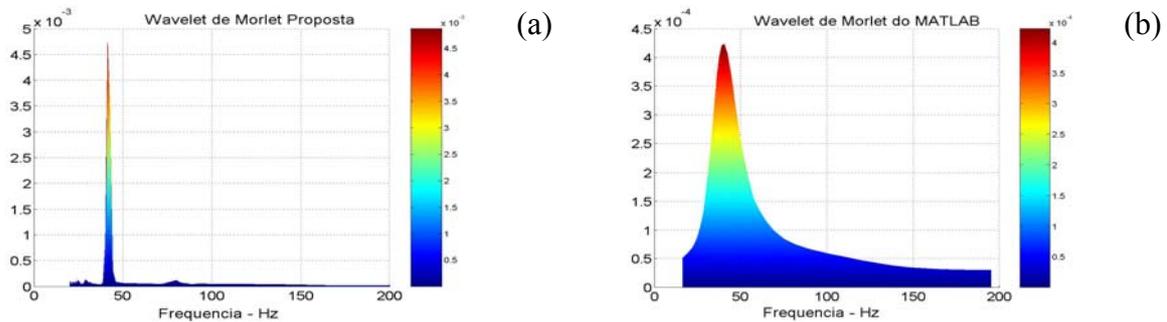


Figura 10: Wavelet em Frequência do Desbalanceamento; (a) Wavelet Proposta e (b) Wavelet do Matlab

Uma comparação entre as resoluções tempo-frequência da wavelet de Morlet proposta e do Matlab são mostradas claramente nas Figuras 10(a) e 10(b). Devido à boa resolução em frequência da wavelet de Morlet proposta, observa-se na Figura 10(a) uma definição clara da frequência de 40 Hz relacionada ao defeito de desbalanceamento. Enquanto, na Figura 10(b) observa-se um espalhamento da energia da wavelet de Morlet do Matlab em torno da mesma frequência, devido a sua pobre resolução em frequência.

A Figura 11(a) mostra claramente o desalinhamento excitando a componente 2X durante todo tempo e o desbalanceamento excitando a componente 1X com maior concentração de energia. Verifica-se também a frequência natural do sistema (27 Hz), aparecendo no mapa tempo-frequência de forma intermitente e com baixa amplitude. Por outro lado, observa-se na Figura 11(b), somente a componente 1X existindo continuamente com baixa resolução em frequência e a componente 2X existindo de forma confusa. Na Figura 12(a) verifica-se claramente as frequências de 27 Hz, 40 Hz e 80 Hz, enquanto que na Figura 12(b) essas frequências não estão bem caracterizadas. Portanto, conclui-se que o espectrograma mostrado na Fig. 11(a) possibilita analisar e caracterizar claramente as componentes que estão excitando a máquina com alta e baixa energia. Do ponto de vista prático, a análise de sinais através da wavelet de Morlet proposta é muito importante no que diz respeito ao monitoramento da condição e diagnóstico de falhas em máquinas rotativas, pois ela possibilita monitorar e detectar o surgimento de uma falha num estágio ainda incipiente.

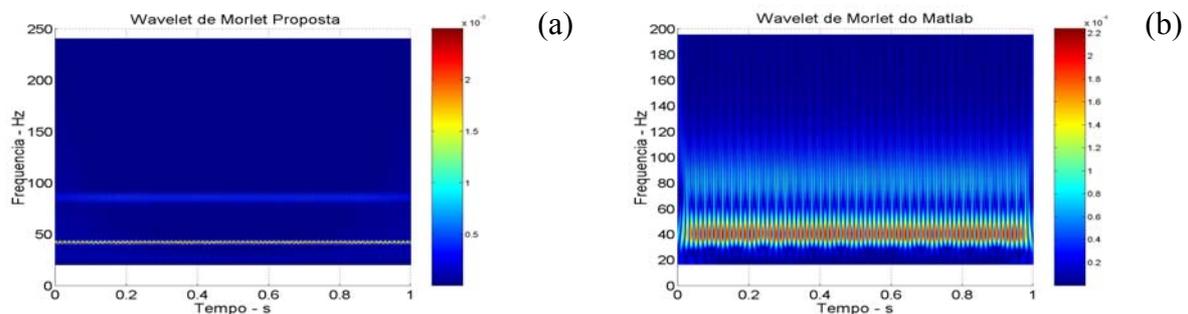


Figura 11: Espectrogramas do Desb. + Desalinhamento; (a) Wavelet Proposta e (b) Wavelet do Matlab

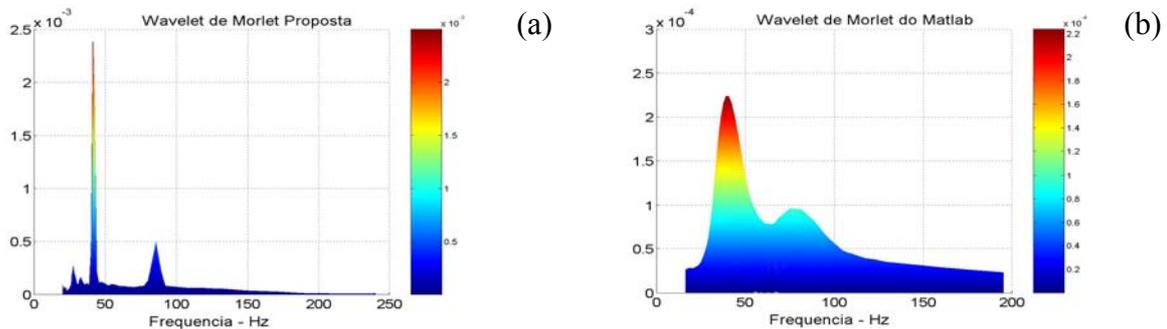


Figura 12: Wavelet em Freqüência do Desb. + Desalinhamento; (a) Wavelet Proposta e (b) Wavelet Matlab

5 CONCLUSÕES

Existem vários métodos convencionais para detecção e diagnóstico de falhas em máquinas rotativas. Estes métodos podem ser no domínio do tempo ou no domínio da frequência. A limitação desses métodos na análise de sinais não-estacionários possibilitou o desenvolvimento de novas técnicas de processamento de sinais. A Transformada de Wavelet (WT) é uma nova ferramenta efetiva para o processamento de sinais estacionários e não-estacionários.

Este trabalho mostra a eficiência de aplicação da análise de wavelet no diagnóstico de falhas mecânicas introduzidas numa bancada experimental de testes. Para isto, faz-se um estudo comparativo entre duas funções wavelet de Morlet e os resultados mostram que o parâmetro que controla sua resolução tempo-freqüência deve ser cuidadosamente selecionado. A wavelet de Morlet proposta apresenta boa resolução no tempo e freqüência e a wavelet de Morlet do Matlab apresenta somente boa resolução no tempo. Vantagens e desvantagens relacionadas à implementação computacional da função wavelet proposta são discutidos, bem como algumas aplicações usando sinais reais e simulados são apresentadas.

6 REFERÊNCIAS

- [1] H. Zhengjia, Z. Jiyuan, H. Yibin and M. Qingfeng, "Wavelet Transform and Multiresolution Signal Decomposition for Machinery Monitoring and Diagnosis", *Proceedings of The IEEE International Conference on Industrial Thecnology*, 724-727, (1996).
- [2] W. Yousheng, S. Qiao, P. Xufeng and L. Xiaolei, "The Application of Wavelet Transform and Artificial Neural Networks In Machinery Fault Diagnosis", *Proceedings of ICSP*, 1609-1612, (1996).
- [3] B. A. Paya, I. I. Esat and M. N. M Badi, "Artificial Neural Network Based Fault Diagnostics of Rotating Machinery Using Wavelet Transforms as a Preprocessor", *Mechanical Systems and Signal Processing*, 11, 751-765, (1997).
- [4] T. Kaewkongka, Y. H. J. Au, R. Rakowski and B. E Jones, "Continuous Wavelet Transform and Neural Network for Condition Monitoring of Rotordynamic

- Machinery”, *IEEE Instrumentation and Measurement Thecnology Conference*, 1962-1996, (2001).
- [5] O. Rioul and M. Vetterli, “Wavelets and Siganal Processing”, *IEEE SP Magazine*, 14-38, (1991).
- [6] J. J. Lee, S. M. Lee, I. Y. Kim, H. K. Min and S. H Hong, “Comparison Between Short –Time Fourier and Wavelet Transform For Feature Extraction of Heart Sound”, *IEEE Tencon.*, 1547-1550, (1999).
- [7] L. Gaul and S. Hurlebaus, “Identification of The Impact Location on a Plate Using Wavelets”, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 12, 783-795, (1997).
- [8] D. F. A. Santiago and R. Pederiva, “Diagnosis Of Mechanical Faults By Wavelet Transform”, *III Congreso Bolivariano de Inegeniería Mecánica – III COBIM*, Lima, Peru, (2003).
- [9] B. H. Chen, X. Z. Wang, S. H. Yang and C. McGreavy, “Application of Wavelets and Neural Networks to Diagnostic System Development, 1, Feature Extraction”, *Computers and Chemical Engineering*. 23, 899-906, (1999).
- [10] Y. T Chan, “Wavelet Basics”, Kluwer Academic Publishers, (1996).
- [11] M. Misiti, Y. Misiti, G. Oppenheim and J.-M Poggi, “Wavelet Toolbox for Use With Matlab, TheMathworks, Inc. MA, U.S.A, (1997).
- [12] A. Graps, “An Introduction to Wavelets”, *IEEE Computacional Science & Engineering*, 50-61, (1995).
- [13] W. J. Staszewski and G. R. Tomlinson, “Application of Wavelet Transform to Fault Detection in a Spur Gear”. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 8, 289-307, (1994)
- [14] J. Lin and L. Qu, “Feature Extraction Based on Morlet Wavelet and Its Application for Mechanical Fault Diagnosis”, *Journal of Sound and Vibration*, 234, 135-148, (2000).
- [15] N. G. Nikolaou and I. A. Antoniadis, “Demodulation Of Vibration Signals Generated By Defects In Rolling Element Bearings Using Complex Shifted Morlet Wavelets”, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 16, 677-694, (2002).