

DETECÇÃO E AVALIAÇÃO DE IMPACTOS EM MECANISMOS DE DIREÇÃO SERVO-ASSISTIDO ATRAVÉS DO USO DA TRANSFORMADA DE WAVELET

Marcos Jun Tsuchie, marcosjun2008@hotmail.com
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

Walter Ponge Ferreira, ponge@ipt.br
Instituto de Pesquisas Tecnológicas - IPT

Resumo: *Sabe-se que folgas e impactos de partes internas reduzem o desempenho da transmissão, do sistema de controle e a qualidade global do mecanismo. Folgas causam instabilidade, mas impactos também geram ruídos estruturais que perturbam medições e causam ruído acústico que reduzem o conforto. Sinais de movimento são frequentemente usados para realimentação e podem ser perturbados por ruídos de impacto. Para superar este problema, um procedimento capaz de detectar e quantificar a severidade e a frequência de ocorrência de impactos é proposto. Desta forma, o desempenho de diferentes sistemas em relação à sua robustez ao impacto podem ser comparados. Sinais de vibração na estrutura do sistema são medidos e o sinal é processado digitalmente e decomposto em múltiplas escalas pela Transformada de Wavelet. As wavelets Harmônicas e de Daubechies são comparadas. Escalas que correspondem aos níveis de detalhamento característico dos impactos são extraídos do sinal de vibração e a severidade do impacto é avaliada. Após o processamento do sinal e a retirada do ruído, o sinal original é disponibilizado para posterior processamento e controle. Foi estudado o ruído de impacto em caixas de direção conhecido com knock noise. Dois exemplos de aplicação são apresentados: impacto produzido em laboratório por um martelo em uma caixa de direção veicular com servo-assistida; e ruído de impacto real adquirido em um sistema de direção veicular com o automóvel em movimento.*

Palavras-chave: ruído, impacto, vibração, wavelet

1. INTRODUÇÃO

Os ruídos e vibrações veiculares produzidos e transmitidos pelo sistema de direção são mais sensíveis ao motorista.

Atualmente, a detecção destes ruídos acústicos na cabine do automóvel é feita de modo subjetivo por um especialista que possui a audição treinada e portanto, não há parâmetros objetivos para julgar o aceiteamento ou não do nível de ruído. Para solucionar este problema, a presente pesquisa visa elaborar um procedimento objetivo para detectar e quantificar a severidade e a frequência de ocorrência de impactos presentes em caixa de direção hidráulica do tipo pinhão e cremalheira.

A Figura 1 ilustra este tipo de sistema e a Fig. (2) ilustra o conjunto torre do sujeitador onde ocorrem parte dos os ruídos de impacto estudados.

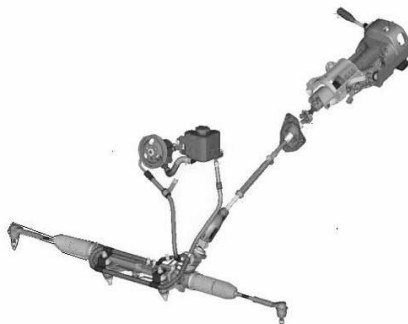


Figura 1. Sistema de Direção Hidráulica.

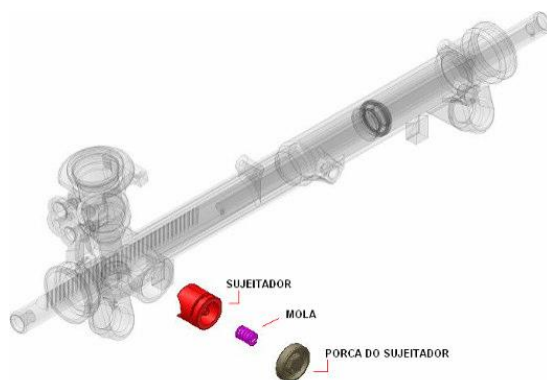


Figura 2. Conjunto Torre do Sujeador.

O sujeitador é o elemento responsável pela prensão da cremalheira contra o pinhão devido à ação da mola.

Cruz (2006) mostra que a função da mola do sujeitador é garantir carga do sujeitador contra a cremalheira e a função da porca do sujeitador é controlar a carga que a mola impõe contra o sujeitador, do sujeitador contra a cremalheira e esta última contra o pinhão.

Devido a vibrações internas e folgas mecânicas presentes neste conjunto são gerados ruídos de impacto que causam desconforto ao usuário.

Estes ruídos de impacto são provenientes da batida dos dentes da cremalheira nos dentes do pinhão, batida do sujeitador na porca do sujeitador e impacto do eixo da cremalheira contra sua bucha guia.

Estes ruídos de impacto foram adquiridos em laboratório e em campo através de acelerômetros fixados em diversos locais da caixa de direção hidráulica.

Em seguida foi aplicada a técnica de análise de sinais pela Transformada de Wavelet. Para comparação, foram utilizadas as wavelets Harmônicas e de Daubechies.

Dentre estas duas wavelets, escolheu-se a que melhor detecta o ruído de impacto no sinal original para quantificar a severidade e a frequência de ocorrência de impactos.

2. WAVELETS

De acordo com Burrus et Al (1998), wavelet significa uma “pequena onda” e esta possui energia concentrada no tempo o que a torna uma ferramenta extremamente útil para análise de sinais transientes e não-estacionários.

Na década de 80, Morlet formalizou a Transformada Contínua de Wavelet:

$$W_x(a,b;\psi) = a^{-1/2} \int x(t) \overline{\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)} dt = \langle x(t), \psi_{ab}(t) \rangle \quad (1)$$

onde a é o parâmetro de escala, b é o parâmetro de tempo, $\psi(t)$ é a wavelet e $\overline{\psi(t)}$ é o complexo conjugado de $\psi(t)$.

De acordo com Newland (1993), o objetivo da Transformada de Wavelet é decompor um sinal arbitrário $f(x)$ em uma soma infinita de wavelets de diferentes escalas sendo que cada uma dessas escalas representam níveis de detalhe do sinal.

Daubechies juntamente com Mallat foram os responsáveis pelo desenvolvimento da teoria de wavelet de sinais contínuos para discreto. Na Transformada Discreta de Wavelet, os parâmetros de escala a e de tempo b são discretizados da seguinte forma:

$$a = a_0^m, \quad b = na_0^m b_0 \quad (2)$$

onde m e n são inteiros. Desta maneira a função contínua de wavelet $\psi_{a,b}(t)$ transforma-se na função discreta de Wavelet a seguir:

$$\psi_{m,n}(t) = a_0^{-m/2} \psi(a_0^{-m} t - nb_0) \quad (3)$$

A discretização dos parâmetros de escala e tempo conduz à Transformada Discreta de Wavelet definida na Eq.(4) a seguir:

$$W_x(m, n; \psi) = a_0^{-m/2} \int x(t) \overline{\psi}(a_0^{-m} t - nb_0) dt \quad (4)$$

A Transformada de Wavelet permite decompor um sinal em seus níveis de detalhe que destacam os ruídos de impacto que deseja-se detectar. A utilização de uma base ortogonal de wavelets permite a reconstrução perfeita do sinal original a partir dos coeficientes da transformada, com a possibilidade de extrair parcelas relacionadas ao fenômeno do impacto do sinal original.

Tanto a família de Wavelets harmônica, quanto a família de wavelets de Daubechies formam bases ortogonais.

2.1. Wavelet de Daubechies

As wavelets de Daubechies foram descobertas por Ingrid Daubechies e formam uma família de wavelets ortogonais suaves com suporte compacto.

Uma função $f(x)$ tem suporte compacto, se existe um intervalo fechado e limitado, fora do qual $f(x) = 0$.

A wavelet mais simples dessa família é a wavelet de Haar que é a única descontínua.

A Figura 3 ilustra algumas wavelets da família de Daubechies e a Fig.(4) ilustra uma função de escala associada a uma wavelet de Daubechies.

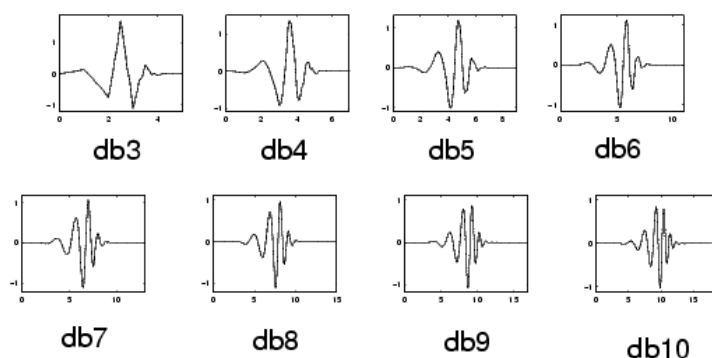


Figura 3. Wavelets da família de Daubechies.

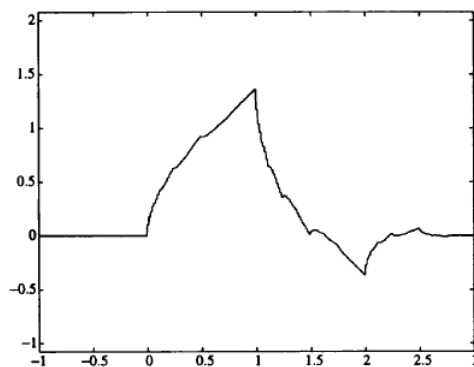


Figura 4. Função de escala de Daubechies.

Em geral, as wavelets de Daubechies são escolhidas para ter o maior número possível de momentos nulos.

De acordo com Lima (2003), a vantagem de uma wavelet possuir vários momentos nulos é pelo fato de conduzir a uma alta compressividade, uma vez que os coeficientes das wavelets das escalas mais finas são essencialmente nulos onde a função é suave.

Cada wavelet possui um número de momentos nulos igual a metade do número de coeficientes.

Um momento nulo limita a habilidade da wavelet em representar o comportamento polinomial ou a informação de um sinal. Por exemplo, wavelets com 4 coeficientes e 2 momentos nulos codificam polinômios com dois coeficientes, isto é, funções constantes e funções lineares.

2.2. Wavelet Harmônica

A Transformada de Wavelet Harmônica foi introduzida em 1993 por David Edward Newland.

A wavelet harmônica é caracterizada por possuir uma estrutura simples de acordo com a Eq. (5) abaixo:

$$w(x) = \{\exp(i4\pi x) - \exp(i2\pi x)\} / i2\pi x \quad (5)$$

A Figura 5 ilustra a parte real e imaginária desta wavelet.

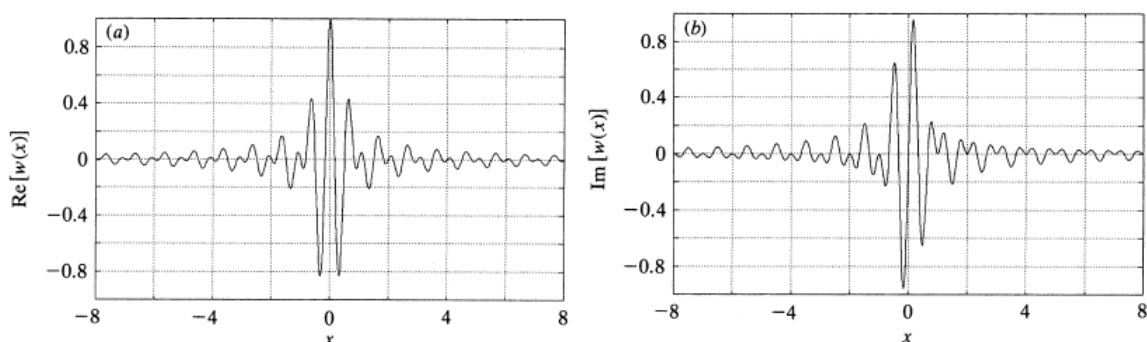


Figura 5. Parte Real e Parte Imaginária da wavelet harmônica respectivamente.

A função de escala associada à wavelet harmônica possui a seguinte estrutura ilustrada na Eq.(6) abaixo.

$$\phi(x) = \{\exp(i2\pi x) - 1\} / i2\pi x \quad (6)$$

A Figura 6 ilustra a parte real e a parte imaginária desta função de escala.

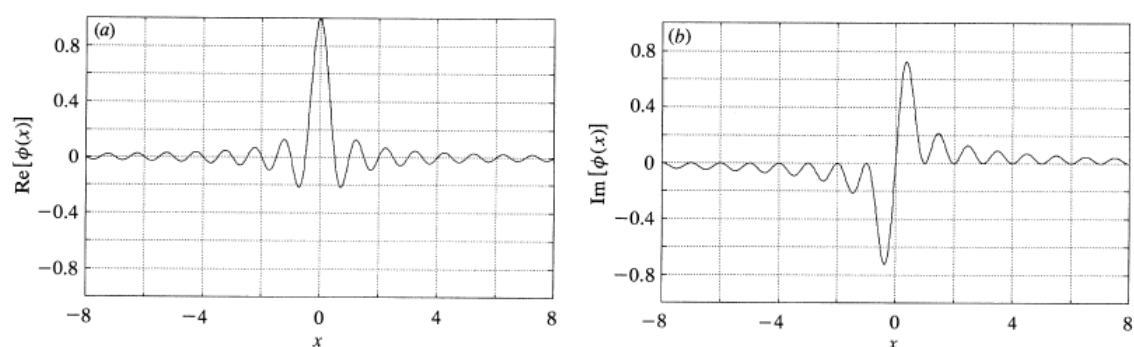


Figura 6. Parte Real e Parte Imaginária da função de escala respectivamente.

De acordo com Nigro (2009), a desvantagem da wavelet Harmônica em relação à wavelet de Daubechies reside no fato de que não é bem definida no domínio do tempo e os seus coeficientes são geralmente complexos e a vantagem reside no fato de que pode ser escrita por funções analíticas simples e é bem definida no domínio da frequência.

3. ENSAIOS DE LABORATÓRIO E DE CAMPO

Nas medições dos sinais de vibração em campo, acelerômetros piezelétricos foram fixados em alguns posições da caixa de direção hidráulica. Foram colocados acelerômetros em duas posições: próximo aos mancais do pinhão e próxima a bucha do eixo da cremalheira. O veículo percorreu em baixa velocidade um trecho de uma rua de paralelepípedos. A perturbação produzida pela irregularidade da pista de paralelepípedos acentua a ocorrência de impactos na caixa de direção. Para isto, foram utilizados os seguintes equipamentos: acelerômetros piezelétricos, condicionadores de sinais, sistema de aquisição de sinal, microcomputador e software de medição e análise de sinais. As medições foram realizadas em um veículo equipado com uma caixa de direção com acentuada ocorrências de impacto.

Na Figura 7 é ilustrado carro, o local e o tipo de rua em que foi conduzido o veículo nas medições de vibração. A imagem do veículo foi propositadamente preservada.

Na medição dos sinais de vibração em laboratório foram utilizados os seguintes equipamentos: dois acelerômetros piezelétricos, amplificadores de carga, sistema de aquisição de sinal, software de aquisição de sinal, microcomputador e um martelo instrumentado com ponta de borracha. Uma caixa de direção hidráulica foi montada rigidamente ao bloco inercial. Nos extremos da cremalheira foram adicionadas duas massas para representar a inércia das barras de conexão às rodas (*inners*), sobre as quais foram afixados os acelerômetros. Os impactos com o martelo instrumentado foram

aplicados sobre estas massas na direção transversal, alinhada com a linha de ação do sujeitador (yoke), e no sentido de compressão da mola do sujeitador.

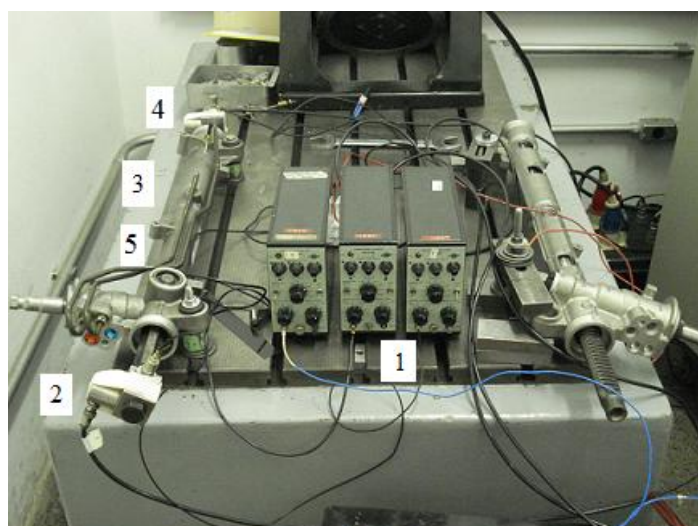
O martelo com ponta de borracha foi utilizado para excitar frequências baixas, até cerca de 100 Hz, características das primeiras frequências naturais de vibração transversal da cremalheira.

Na Figura 8 é mostrada a bancada de ensaio utilizada para realização do experimento de laboratório. Sobre a massa inercial pode-se ver duas caixas de direção montadas. Uma na configuração original e outra modificada, com aberturas na carcaça, para permitir estudar o movimento interno da cremalheira.

Os sinais de vibração medidos em laboratório e apresentado na sessão de resultados, foi obtido posicionando-se a cremalheira de tal forma que o acelerômetro 2, do lado próximo ao pinhão, estivesse a uma distância de 140 mm deste. Para excitar a vibração da cremalheira foram realizadas marteladas na direção do sujeitador na extremidade da cremalheira na qual fixou-se o acelerômetro 2. Os sinais dos acelerômetros foram amplificados, digitalizados pelo sistema de aquisição e salvos em formato de arquivo texto por um software de análise de sinais. Posteriormente estes sinais foram analisados com software de análise de sinais. Foi utilizada a biblioteca de funções para Wavelet no caso da transformada de Daubechies. A transformada Harmônica foi implementada de acordo com as referências Newland (1993) e Nigro (2009).



Figura 7. Carro, local e rua.



- 1 - Amplificadores de Carga
- 2 - Acelerômetro
- 3 - Caixa de Direção
- 4 - Acelerômetro
- 5 - Yoke

Figura 8. Bancada de Medição.

4. RESULTADOS

Os sinais de vibração adquiridos em campo e em laboratório foram analisados com a Transformada de Wavelet para análise em tempo-frequência (tempo-escala) para a detecção de ruídos de impacto de partes metálicas dentro da

caixa de direção hidráulica. Posteriormente os sinais foram quantificados quanto a severidade e frequência de ocorrência dos impactos. Para isto, foram utilizadas as Wavelets de Daubechies e Newland.

Na Figura (9) é apresentado o sinal de vibração medido no extremo da cremalheira quando excitada com o martelo instrumentado. Pode-se observar sobreposto à vibração transversal da cremalheira (cerca de 120 Hz) os sinais de impactos da cremalheira contra as partes metálicas da caixa, i.e., pinhão e bucha guia. Sabe-se que este ruído de impacto possuem frequências em torno de 6 kHz, características do impacto das partes metálicas. Observam-se impactos em 6, 10, 23 e 42 ms.

Inicialmente foi aplicada a Wavelet de Daubechies. Foi preciso selecionar qual a melhor ordem da Wavelet desta família a ser utilizada e o nível de detalhamento a ser utilizado na decomposição e filtragem do sinal de impacto.

Inicialmente foi aplicada a wavelet de Daubechies de ordem 3 e foram detalhados 2 níveis.

A ocorrência de impactos da cremalheira dentro da caixa de direção é simples de ser detectada como pode ser observado nos sinais apresentados na Figura (10). Nesta figura são mostrados o sinal original de vibração, o sinal dos níveis de detalhe característicos dos impactos e o sinal reconstituído sem os níveis de detalhe característicos dos impactos. No sinal dos níveis de detalhamento pode-se reconhecer facilmente a ocorrência dos impactos. Os sinais original e reconstituído são muito parecidos, pois neste último ainda aparecem os ruídos de impacto. Portanto a função Wavelet com este nível de detalhamento não foi adequada para separação dos sinais de impacto.

Para contornar este problema foi aumentado a ordem da Wavelet para 7 e o nível de detalhamento para 3. O resultado obtido é mostrados na Figura (11). Nota-se claramente que os ruídos de impacto foram separados do sinal de vibração. Portanto, os parâmetros adotados na Transformada Wavelet são adequados para separação dos sinais de vibração transversal da cremalheira dos sinais de impacto metálico.

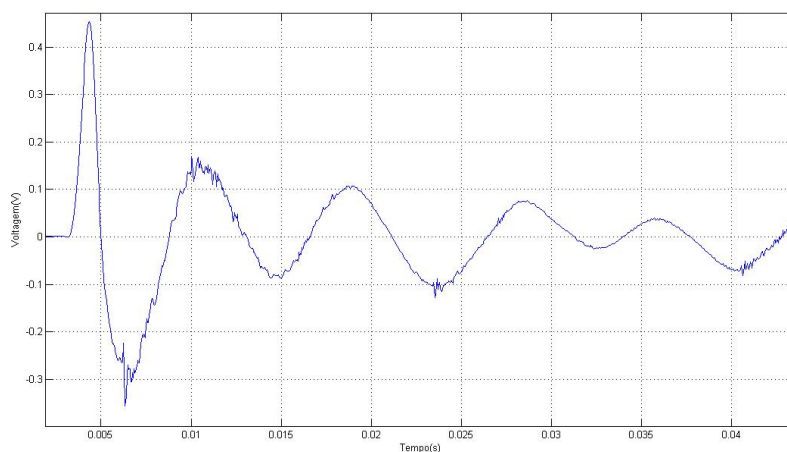


Figura 9. Sinal de Vibração adquirido em laboratório.

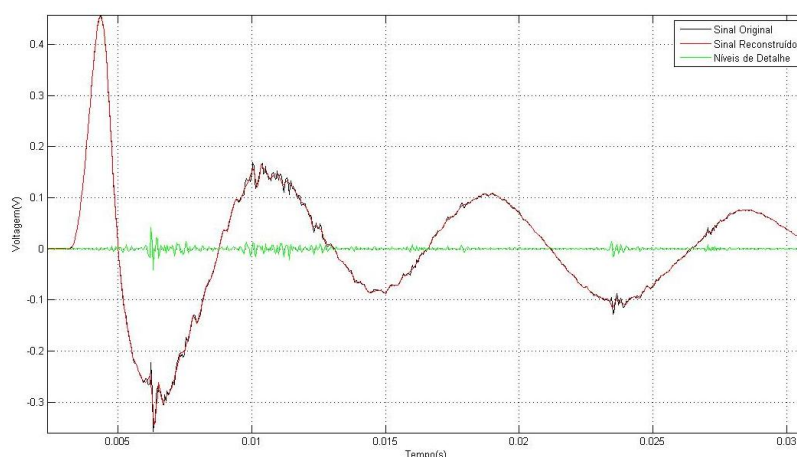


Figura 10. Wavelet de Daubechies de ordem 3 e 2 níveis de detalhamento.

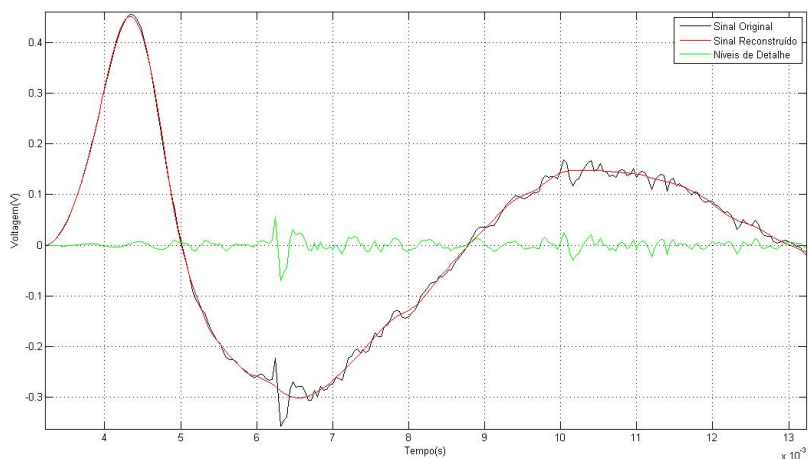


Figura 11. Wavelet de Daubechies de ordem 7 e 3 níveis de detalhamento.

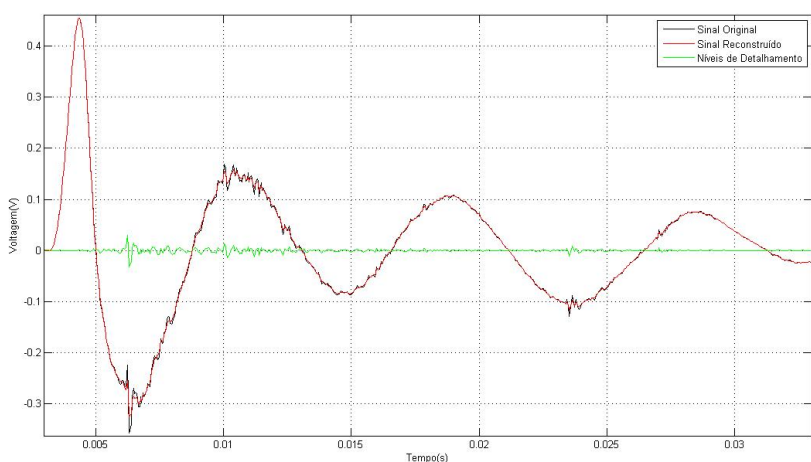


Figura 12. Wavelet de Newland com 3 níveis de detalhamento.

Repetindo-se a análise com a Wavelet Harmônica de Newland com 3 níveis de detalhamento obteve-se o resultado mostrados na Figura (12). Pelo resultado obtido, nota-se que a wavelet de Newland não conseguiu separar os ruídos de impacto do sinal original. Aumentando-se o nível de detalhamento para 4, obteve-se o resultado semelhante, conforme mostrado na Figura (13). Pelo resultado, percebe-se que próximo a 4 ms o sinal reconstruído ainda apresenta distorção e ruídos de impacto.

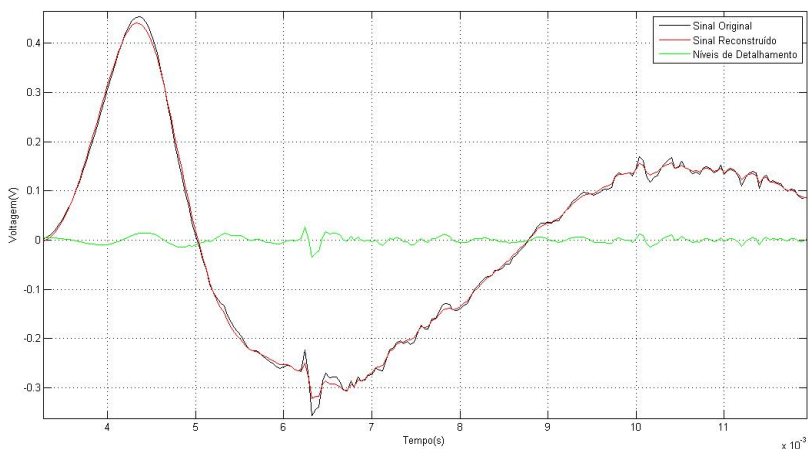


Figura 13. Wavelet de Newland com 4 níveis de detalhamento.

O aumento dos níveis de detalhe não foi capaz de separar adequadamente os ruídos de impacto do sinal. Portanto conclui-se que a Wavelet Harmônica de Newland não apresentou desempenho adequado para separar os ruídos de impacto do sinal de vibração e dessa forma não foi utilizada na detecção dos impactos.

Para quantificar a severidade dos ruídos de impacto foi utilizado o valor eficaz (R.M.S) do trecho do sinal que contém esses ruídos. No caso deste sinal de vibração, os ruídos de impacto concentram-se no intervalo de tempo de 6 ms a 12 ms. O valor eficaz desse trecho é 133 mV.

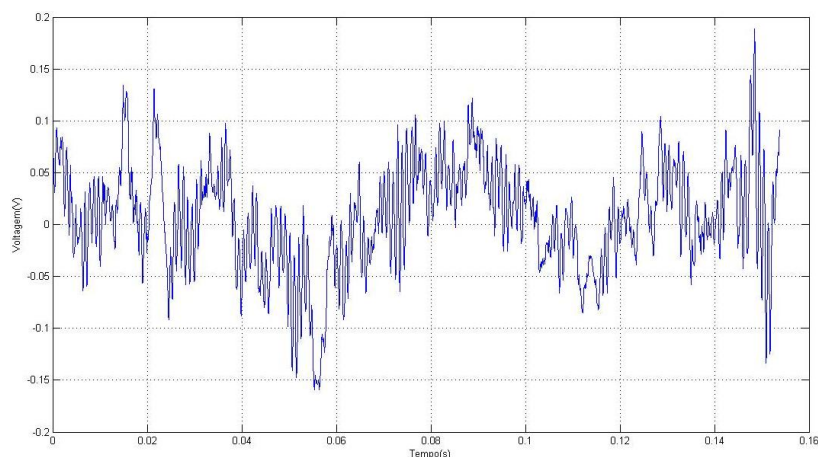


Figura 14. Sinal de vibração real adquirido em campo.

Os mesmos procedimentos foram aplicados a um sinal de vibração medido em campo, mas desta vez somente a Wavelet de Daubechies foi aplicada. Este sinal é mostrado na Figura (14).

Aplicando a Wavelet de Daubechies de ordem 7 e retirando-se os 3 primeiros níveis de detalhe, obteve-se o resultado ilustrado na Fig. (15). Por este resultado, percebe-se que ainda existem ruídos de impacto no sinal reconstruído. Para resolver este problema, foram retirados do sinal original 5 níveis de detalhamento e o resultado obtido encontra-se na Fig. (16) abaixo.

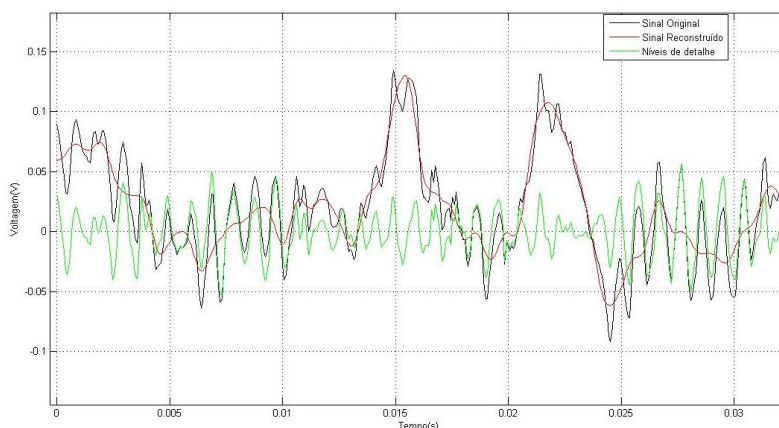


Figura 15. Wavelet de Daubechies de ordem 7 e 3 níveis de detalhamento.

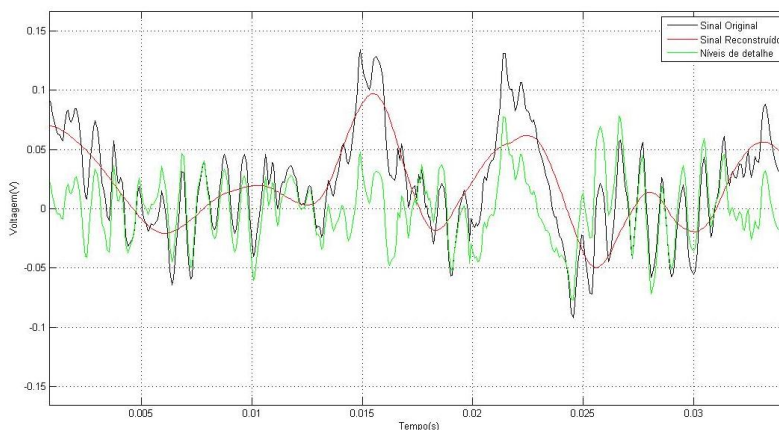


Figura 16. Wavelet de Daubechies de ordem 7 e 5 níveis de detalhamento.

Por este resultado, nota-se que os ruídos de impacto foram separados do sinal de vibração. Neste sinal de vibração os ruídos de impacto concentram-se ao longo de todo o sinal de vibração e portanto valor eficaz foi calculado sobre todo o sinal obtendo-se o valor de 286 mV.

Portanto, a severidade do ruído do sinal adquirido em campo é maior do que aquele obtido em laboratório. Isto ocorre porque os sinais adquiridos em campo apresentam muito mais impactos uma vez que foram adquiridos com o carro em movimento em uma rua repleta de paralelepípedos.

Estudos estão sendo realizados para determinar o valor eficaz limite, que servirá como um dos parâmetros de avaliação do nível de ruído produzido pelo impacto das partes da caixa de direção.

Para quantificar a frequência de ocorrência de impactos foi criada uma janela móvel com largura de 13 ms que percorreu todo o sinal original. Verificou-se quando o sinal original ultrapassou em 30% o valor do sinal reconstruído sem os ruídos de impacto. Caso afirmativo, foi considerado a ocorrência de um impacto nesta janela. Aplicando esse procedimento sobre o sinal adquirido em laboratório foram registrados 64 impactos, nas 256 janelas analisadas para percorrer o sinal inteiro. Aplicando o mesmo procedimento sobre o sinal adquirido em campo foram registrados 36 impactos dentro da caixa de direção.

5. CONCLUSÃO

A Transformada de Wavelet pode ser aplicada para detectar ocorrência de impactos internos em caixas de direção automotiva.

As Wavelets da família de Daubechies apresentaram melhores desempenho em comparação com a Wavelet Harmônicas de Newland na detecção e remoção dos ruído de impacto do sinal de vibração medido.

O valor eficaz foi utilizado para quantificar a severidade do impacto, mas estudos mais aprofundados serão necessários para determinar os parâmetros ideais e valores admissíveis para avaliação do nível de ruído. Com isso, pretende obter um critério quantitativo para avaliação do ruído de impacto na caixa de direção, retirando-se assim a subjetividade desta avaliação.

O critério de valor relativo foi adotado para quantificar a frequência de ocorrência de impactos, mas estudos estão sendo realizados para escolher ou combinar novos critérios.

6. REFERÊNCIAS

- Cruz, J., M., X., 2006, “Estudo de Caso de Ruído Knock Noise em Mecanismo de Direção Hidráulica Tipo pinhão-cremalheira”, Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- Newland, D., E., 1993, “An Introduction to Random Vibrations, Spectral and Wavelet Analysis”, Third Edition, University of Cambridge.
- Nigro, P., S., B., 2009, “Geração de Ação Dinâmica de Estruturas Baseada em Transformada de Wavelet Harmônica”, Dissertação de Mestrado, São Paulo.
- Burrus, C., S., Gopinath, R., A., Guo, H., “Introduction to Wavelets and Wavelet Transform”, 1998, Electrical and Computer Engineering Department and Computer and Information Technology Institute Rice University, Houston, Texas.
- Lima, P., C., “Wavelets: Uma Introdução”, 2003, Departamento de Matemática, UFMG, Minas Gerais.
- Li, L., Qu, L., Liao, X., 2006, “Haar wavelet for machine fault diagnosis”, Institute of Mechanical and Material Engineering, PR China.
- Peng, Z., K., Chu, F., L., 2002, “Application of the Wavelet Transform in Machine Condition Monitoring and Fault Diagnostics: a Review with Bibliography”, Department of Precision Instruments, Tsinghua University, China.

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.



VI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA
VI NATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING
18 a 21 de agosto de 2010 – Campina Grande – Paraíba - Brasil
August 18 – 21, 2010 – Campina Grande – Paraíba – Brazil

IMPACTS DETECTION AND EVALUATION OF STEERING SYSTEM WITH SERVO ASSISTANCE BY THE USE OF WAVELET TRANSFORM

Marcos Jun Tsuchie, marcosjun2008@hotmail.com
Escola Politécnica of São Paulo University

Walter Ponge Ferreira, ponge@ipt.br
Institute of Technology Researches - IPT

***Abstract.** It is well known that backlash and impact of inner parts reduce the performance of transmission, control systems and overall quality of mechanism. Clearance causes instability, but impact also generates structural borne noise that disrupt measurements and cause acoustic noise that reduces the comfort. Motion signals are often used for feedback and can be disrupted by impact noise. In order to overcome this problem an procedure able to detect and quantify the severity and rate of occurrence of impacts is proposed. Thence performance of different systems in regard to their robustness to impact can be compared. A procedure to detect and evaluate impacts of inner parts of mechanical mechanism is presented. Therefore, vibration signals on the structure of the system are measured and the signal is digitally processed and decomposed into multiscales by the Wavelet transform. Both Daubechies and Harmonic Wavelet are compared. Scales that corresponds to the impact response are extracted from the overall vibration signal, and the impact severity is rated. After signal processing and de-noising, the original signal without the impact is also available for further processing and control. Two examples of application are presented: impact produced in an passenger vehicle steering system with servo assistance due to radial clearance on bearings and knock noise in an passenger vehicle steering system with servo assistance.*

Keywords: *noise, impact, vibration, wavelet*