







limitadas por el ancho de la ventana de datos a analizar. Por otro lado, *WVD* puede generar niveles de energía negativos y espectros difíciles de analizar. Otra alternativa propuesta por [Prabhakar et al., 2002] llamada *EWA (Exact Wavelet Analysis)* fue desarrollada para generar múltiples onduletas madres que producen varias onduletas hijas que son adaptivas a las características de la señal inspeccionada. Otros métodos como el uso de la onduleta armónica *HW (Harmonic Wavelet)*, han dado buenos resultados por el uso de la *FFT* y la *FFT* inversa en el algoritmo *HW* [Chancey et al., 2002]. [Nikolaou and Antoniadis, 2002] propusieron el uso de *WPT (Wavelet Packet Transform)* donde la señal se descompone en detalles y aproximaciones (y en componentes más finos).

[Zhang and Gao, 2004] demostró que *WT* puede identificar fallas en las pistas internas y externas, a diferencia de *FT* solo en pistas externas. Un año después, [Zhang et al., 2005], trabajo con el eje desbalanceado y finalmente [Zhang et al., 2006], explotando la onduleta envolvente y analítica, las fallas en el elemento rodante fueron identificadas.

Muchas mejoras han surgido al combinar los diferentes métodos. [He et al., 2009] incluyó pequeñas contracciones en los filtros de las onduletas obteniendo señales sin ruido. [Rafiee et al., 2010] analizó 324 onduletas madre concluyendo que la onduleta *db44* tiene la forma más adecuada para la detección de fallas, aunque demandan mucho tiempo computacional. [Wang et al., 2011] demostró que la mejor onduleta madre corresponde a los modelos de un solo lado, en lugar de dos lados para detección de fallas localizadas en rodamientos. La Tabla 3 presenta el estado del arte en investigación de fallas en rodamientos utilizando *WT*.

**Tabla 3 – Investigación cronológica sobre detección fallas en HSM utilizando onduletas**

Referencia	Defecto	Caso Estudio	Técnica	Análisis Adicional	Clasificador y Eficiencia
[Mori et al., 1996]	OR	Test Rig 660 RPM	DWT MW: Db	NA	Max Value Coeff
[Paya et al., 1997]	IR	Test Rig 4230 RPM	CWT MW: Db4	NA	ANN 96%
[Tse et al., 2001]	IR, OR, RE	Test Rig 1200 RPM	CWT MW: Gauss	NA	Visual
[Nikolaou & Antoniadis, 2002]	IR, OR	Simulation / Test Rig 1500 RPM	WPT MW: Db12	Energy Of Coefficients	Visual
[Prabhakar et al., 2002]	IR, OR	Vibration tester 1800 RPM	DWT MW: Db4	RMS, K, FFT	Visual
[Shi et al., 2004]	IR, OR	Simulation / Test Rig 1398 RPM	EWA MW: Multiple	NA	Visual
[Tse et al., 2004]	IR, OR	Simulation / Test Rig 1398 RPM	EWA MW: Multiple	NA	Visual
[Shi et al., 2004]	IR, OR, RE	Test Rig 1000 RPM	CWT MW: Gauss	Envelope Spectrum	Visual

[Purushotham et al., 2005]	IR, OR, RE, CO	Test Rig 1300 RPM	DWT MW: Db2	MFCC	HMM 99%
[Yan and Gao, 2005]	OR	Test Rig 1200 RPM	WPT MW: Harmonic	DPE	MLP, 99% RBF, 100%
[Zhang et al., 2006]	IR, OR, RE, CO	Test Rig 8400 RPM	AWE	FT	Visual
[He et al., 2009]	IR, OR	Simulation Test Rig 1500 RPM	CWT MW: Morl	SCS	NA
[Rafiee et al., 2010]	IR, OR, RE, CO	Test Rig 1420 RPM	CWT MW: 324 Best: Db44	$\sigma$ , $\sigma^2$ , K & 4 <sup>th</sup> central moment coeffs	NA
[Kankar et al., 2011]	IR, OR, RE, CO	Test Rig 2000 RPM	MW: 7 Best: Cmorl	Ks, Skewness & $\sigma$	SVM 100%
[Wang et al., 2011]	IR, OR, RE	Simulation / CWRU 1796 RPM / Test Rig 1496 RPM	MW: Laplace, Single-Side HW	Correlation filtering	Automatic Estimation
[Yan and Gao, 2011]	OR	Test Rig 2000 RPM	WPT MW: Bior5.5.	K & energy of coeffs	ANN 93%
[Liu, 2012]	IR, OR	CWRU 1796 RPM / Test Rig 1920 RPM	Shannon Wavelet Spectrum	EMA Power Filtering	Visual
[Pandya et al., 2012]	IR, OR, RE	TR 1000 RPM	WPT MW: Rbio5.5	K & energy of coeffs	ANN 93%
[Chandel and Patel, 2013]	IR, OR, RE	CWRU 1796 RPM	WPD MW: Db10	Power, coeffs, auto-correlation function	ANN 100%
[Cui et al., 2016]	IR, OR, RE	CWRU 1796 RPM	AWD	Time-frequency features	Grey analysis correlation 100%
[Kedadouche et al., 2016b]	OR	Test Rig 600 RPM	EWT	NA	Visual
[Kedadouche et al., 2016a]	IR, OR	CWRU 1796 RPM / Test Rig 600 RPM	EWT	EMD	Visual
[YanPing et al., 2006]	UB, ML, OW	Test Rig 10000 RPM	CWT MW: Morl	WGM & WGMV	Numérico
[Chen et al., 2013]	UB,	Simulation 110 RPM	DWT MW: Db10	PSD	Visual
[Peng et al., 2007]	UB, OW, ML	Test Rig 3000 RPM	CWT	WTMM & Lipschitz exponent	Numérico

#### 4. Caso de estudio

La base de datos utilizada fue del centro de datos de la *Case Western Reserve University (CWRU)*, la cual es una

referencia estándar en el campo de diagnóstico de fallas en rodamientos.

Este sistema consiste en: (1) Motor eléctrico de 2 hp, (2) Dinamómetro para aplicar cargas al eje, (3) Acelerómetros ubicados a un costado de los rodamientos y (4) Rodamientos: 6205-2RS JEM SKF, 6203-2RS JEM SKF. Las características de los rodamientos son: diámetro interno: 0.9843 in, diámetro externo: 2.0472 in, diámetro de elemento rodante: 0.3126 in, y diámetro de paso: 1.537 in; número de elementos rodantes: 9.

Los datos se obtuvieron con el motor funcionando a velocidad constante y cargas constantes de 0-3 hp, con en una velocidad de eje de 1,797-1,720 rpm. Para los ensayos, se consideraron diferentes tipos de fallas con un diámetro de 0,007 a 0,028 plgs en los rodamientos. Cada falla fue inducida en los elementos rodantes, en la pista interna o externa usando maquinaria de electro-descarga.

El procesamiento de la señal fue realizado con la herramienta de MATLAB Wavelet Toolbox. Considerando la revisión bibliográfica, [Paya et al., 1997], se utilizó la onduleta *Daubechies (db4)*.

Una de las principales ventajas de la *WT* es su característica intrínseca de actuar como filtro de ruido. La *DWT* actúa como un par de filtros pasa altas y pasa bajas, descomponiendo la señal en aproximaciones (bajas frecuencias) y detalles (altas frecuencias). Por cada nivel de descomposición, las bajas frecuencias se siguen filtrando. Por su eficiencia de computo, la *DWT* permite un buen acercamiento para analizar bajas frecuencias. En la Fig. 3 se muestra la descomposición de una señal con falla en la pista externa, considerando las aproximaciones y detalles hasta el cuarto nivel y para su fácil visualización solamente se muestran dos revoluciones.

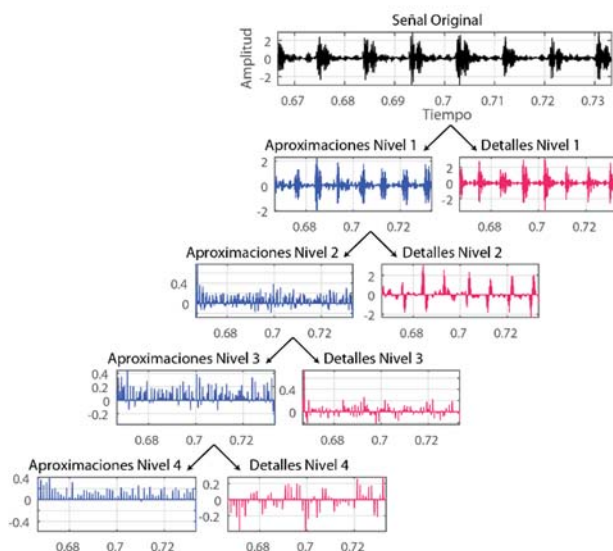


Figura 3 Descomposición de señal con falla en OR.

En general, se utilizan de 3 a 4 niveles de descomposición al utilizar onduletas, mayor cantidad de niveles reducen la resolución temporal y la energía de la señal se condensa en menos coeficientes, lo cual podría no ser eficaz; [Nikolaou & Antoniadis, 2002]

A la señal descompuesta, se le pueden aplicar diferentes algoritmos de filtrado en cada una de las etapas de acuerdo al rango de frecuencia requerido. Una vez filtrada, la señal se reconstruye, sumando los coeficientes del último nivel de aproximaciones con todos los niveles de detalles. La Fig. 4 muestra la comparación entre la señal original y la señal filtrada, aplicando un umbral suave para depurar el nivel 4.

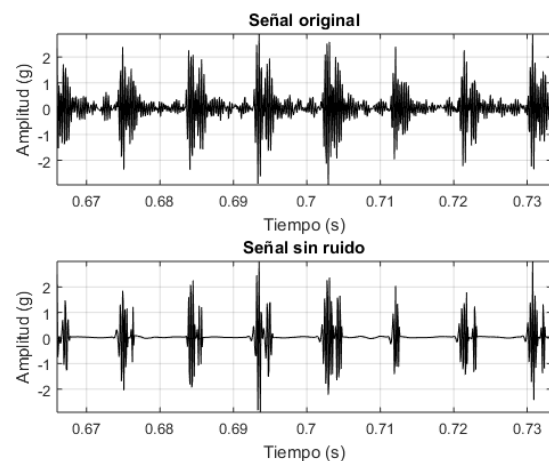
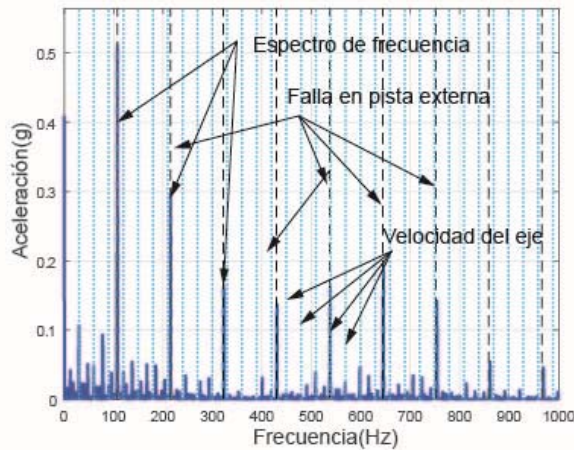


Figura 4 Aplicación de un umbral suave filtrando el ruido

Analizando la señal filtrada en el espectro de frecuencia se puede visualizar claramente la frecuencia de falla de la OR y sus armónicos. La Fig. 5 muestra líneas guía espaciadas el valor de la frecuencia de falla para la OR (BPFO=108 Hz, línea entrecortada), así como referencias para la velocidad de rotación del eje (30 Hz, línea punteada). Para una señal sin falla se espera que las crestas del espectro de mayor magnitud, frecuencia fundamental y sus armónicos, coincidan con la frecuencia de rotación del eje. Sin embargo, cuando existe una falla, los valores representativos del espectro coinciden con la frecuencia de falla, como se observa en este caso.



**Figura 5 Frecuencia de falla de la OR y sus armónicos**

La DWT dentro de todos los tipos de WT es la más simple computacionalmente, por lo cual el tiempo de ejecución es inferior.

La reducción de ruido que puede realizarse mediante la DWT permite resaltar la falla, considerándose esto un gran aporte para aplicarla en el análisis de vibraciones de HSM a nivel industrial, donde las fallas se enmascaran por el ruido.

Cuando se requiere obtener información a altas frecuencias DWT presenta grandes desventajas, principalmente una mala resolución, ya que la descomposición de esta transformada se enfoca en rangos de bajas frecuencias.

## 5. Conclusión

Un sistema de detección y diagnóstico de fallas en rodamientos de husillos es una herramienta de competitividad industrial en la industria manufacturera, especialmente en sistemas de mecanizado de alta velocidad en donde el desempeño del husillo juega un papel crucial tanto en la calidad del producto como en la economía del proceso. El uso de la transformada de onduletas ha resultado una excelente herramienta para el análisis de señales de vibración; permitiendo la detección de fallas partir de conocer las frecuencias de estas. El análisis de fallas en altas revoluciones es un área de oportunidad debido a que la mayoría de los análisis están enfocados a la detección de fallas a bajas velocidades.

## REFERENCIAS

[Chancey et al., 2002] V.C. Chancey, G.T Flowers, and C.L. Howard. *A Harmonic Wavelets Approach for Extracting Transient Patterns From Measured Rotor Vibration Data*. *J of Eng for Gas Turbines and Power*, 125(1):81–89, 2002.

[Chandel and Patel, 2013] A.K. Chandel and R.K. Patel. *Bearing Fault Classification based on Wavelet Transform and Artificial Neural Network*. *IETE J of Research*, 59(3):219–225, 2013.

[Chen et al., 2013] D. Chen, J. Fan, and F. Zhang. *Extraction the Unbalance Features of Spindle System using Wavelet Transform and Power Spectral Density*. *Measurement*, 46(3):1279–1290, 2013.

[Cui et al., 2016] H. Cui, Y. Qiao, Y. Yin, and M. Hong. *An Investigation of Rolling Bearing Early Diagnosis based on High-Frequency Characteristics and Self-Adaptive Wavelet De-noising*. *Neurocomputing*, 216:649–656, 2016.

[He et al., 2009] W. He, Z.N. Jiang, and K. Feng. *Bearing Fault Detection based on Optimal Wavelet Filter and Sparse Code Shrinkage*. *Measurement*, 42(7):1092–1102, 2009.

[Kankar et al., 2011] P.K. Kankar, S.C. Sharma, and S.P. Harsha. *Rolling Element Bearing Fault Diagnosis using Wavelet Transform*. *Neurocomputing*, 74(10):1638 – 1645, 2011.

[Kedadouche et al., 2016a] M. Kedadouche, Z. Liu, and V.H. Vu. *A New Approach based on OMA-Empirical Wavelet Transforms for Bearing Fault Diagnosis*. *Measurement*, 90:292–308, 2016.

[Kedadouche et al., 2016b] M. Kedadouche, M. Thomas, and A. Tahan. *A Comparative Study Between Empirical Wavelet Transforms and Empirical Mode Decomposition Methods: Application to Bearing Defect Diagnosis*. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 81:88 – 107, 2016.

[Liu, 2012] J. Liu. *Shannon Wavelet Spectrum Analysis on Truncated Vibration Signals for Machine Incipient Fault Detection*. *Measurement Science and Technology*, 23(5):055604, 2012.

[Mais, 2002] J Mais. *Spectrum Analysis: The Key Features of Analyzing Spectra*, 2002.

[Mori et al., 1996] K. Mori, N. Kasashima, T. Yoshioka, and Y. Ueno. *Prediction of Spalling on a Ball Bearing by Applying the Discrete Wavelet Transform to Vibration Signals*. *Wear*, 195(1-2):162–168, 1996.

[Nikolaou and Antoniadis, 2002] N.G. Nikolaou and I.A. Antoniadis. *Rolling Element Bearing Fault Diagnosis using Wavelet Packets*. *NDT & E Int*, 35(3):197 – 205, 2002

[Pandya et al., 2012] D.H. Pandya, S. Upadhyay, and S.P. Harsha. *ANN Based Fault Diagnosis of Rolling Element Bearing using Time-Frequency Domain Feature*. *Int J of Eng Science and Technology*, 4(6):2878–2886, 2012.

[Paya et al., 1997] B.A. Paya, I.I. Esat, and M.N.M. Badi. *Artificial Neural Network based Fault Diagnostics for Rotating Machinery using Wavelet Transforms as a Preprocessor*. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 11(5):751 – 765, 1997.

- [Prabhakar et al., 2002] S. Prabhakar, A.R. Mohanty, and A.S. Sekhar. *Application of Discrete Wavelet Transform for Detection of Ball Bearing Race Faults*. Tribology Int, 35(12):793 – 800, 2002.
- [Purushotham et al., 2005] V. Purushotham, S. Narayanan, and S.A.N. Prasad. *Multi-Fault Diagnosis of Rolling Bearing Elements using Wavelet Analysis and Hidden Markov Model based Fault Recognition*. NDT & E Int, 38(8):654 – 664, 2005.
- [Peng et al., 2007] Z.K. Peng, F.L. Chu, and P.W. Tse. *Singularity Analysis of the Vibration Signals by Means of Wavelet Modulus Maximal Method*. Mechanical Systems and Signal Processing, 21(2):780–794, 2007.
- [Rafiee et al., 2010] J. Rafiee, M.A. Rafiee, and P.W. Tse. *Application of Mother Wavelet Functions for Automatic Gear and Bearing Fault Diagnosis*. Expert Systems with Applications, 37(6):4568 – 4579, 2010.
- [Randall, 2011] R.B. Randall. *Vibration-based Condition Monitoring: Industrial, Aerospace and Automotive Applications*. EBL-Schweitzer. John Wiley & Sons, 2011.
- [Rathbone, 1939] T.C. Rathbone. *Vibration Tolerance*. Power Plant Eng, 43(1939):721– 724, 1939.
- [Shi et al., 2004] D.F. Shi, W.J. Wang, and L.S. Qu. *Defect Detection for Bearings using Envelope Spectra of Wavelet Transform*. J of Vibration and Acoustics, 126(4):567–573,
- [Tse et al., 2001] P.W. Tse, Y.H. Peng, and R. Yam. *Wavelet Analysis and Envelope Detection for Rolling Element Bearing Fault Diagnosis Their Effectiveness and Flexibilities*. J of Vibration and Acoustics, Trans of the ASME, 123:303–10, 2001
- [Tse et al., 2004] P.W. Tse, W.X. Yang, and H.Y. Tam. *Machine Fault Diagnosis through an Effective Exact Wavelet Analysis*. J of Sound and Vibration, 277(4):1005–1024, 2004.
- [Wang et al., 2011] S. Wang, W. Huang, and Z.K. Zhu. *Transient Modeling and Parameter Identification Based on Wavelet and Correlation Filtering for Rotating Machine Fault Diagnosis*. Mechanical Systems and Signal Processing, 25(4):1299 – 1320, 2011.
- [Yan and Gao, 2005] R. Yan and R.X. Gao. *An Efficient Approach to Machine Health Diagnosis based on Harmonic Wavelet Packet Transform*. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 21(4-5):291–301, 2005.
- [Yan and Gao, 2011] R. Yan and R.X. Gao. *Wavelet Domain Principal Feature Analysis for Spindle Health Diagnosis*. Structural Health Monitoring, 10(6):631–642, 2011.
- [YanPing et al., 2006] Z. YanPing, H. Shuhong, H. Jinghong, S. Tao, and L. Wei. *Continuous Wavelet Grey Moment Approach for Vibration Analysis of Rotating Machinery*. Mechanical Systems and Signal Processing, 20(5):1202–1220, 2006.
- [Zhang and Gao, 2004] L. Zhang and R.X. Gao. *Customized Wavelet for Bearing Defect Detection*. J of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 126:740–745, 2004.
- [Zhang et al., 2005] L. Zhang, R.X. Gao, and K.B Lee. *Wavelet-based Enveloping for Spindle Health Diagnosis*. In Instrumentation and Measurement Technology Conf, 2005. Proc of the IEEE, volume 2, pages 1203–1208, 2005.
- [Zhang et al., 2006] L. Zhang, R.X. Gao, and K.B. Lee. *Spindle Health Diagnosis based on Analytic Wavelet Enveloping*. IEEE Trans on Instrumentation and Measurement, 55(5):1850–1858, Oct 2006.