



Detección de fallas en TFMs usando análisis tiempo-frecuencia

Osmel Reyes
Jesús Cabrera

Recibido: Enero del 2008
Aprobado: Marzo del 2008

Resumen / Abstract

Las fallas de rodamiento en los rotores medidores de flujo de tipo turbina, no tienen una clara manifestación en las representaciones espectrales o temporales de la serie de tiempo de la señal de salida de estos medidores. Los escalogramas obtenidos de la señal de estos medidores en condiciones de falla usando la transformada continua de wavelet (CWT), han revelado diferencias visuales entre estas y las obtenidas en buenas condiciones. El análisis de singularidades de la matriz de coeficientes de correlación $C(b,a)$ para los diferentes segmentos de sus vectores, basado en el cálculo de los exponentes de Lipschitz (criterio de continuidad de Hölder), mostró un comportamiento singular asociado a la existencia de transientes locales causados por fallas en los rodamientos. Los resultados del empleo del análisis tiempo-frecuencia para la detección de estas fallas son presentados en este artículo.

Palabras clave: Flujómetro de turbina, detección de fallas, transformada Wavelet continua

Rotor ball-bearing faults manifestation on turbine flow meters do not appear clearly either in time or spectral domain representation of its output signal. Scalograms obtained from turbine flow meter output signal on faulty conditions, using continuous Wavelet transform (CWT) revealed visual differences from the ones obtained in good conditions. Singularity analysis of the correlations coefficient matrix $C(b,a)$ for different segments of these vectors, based upon Lipschitz exponent calculation (Hölder continuity criterion), showed local singular behavior associated to high speed transients caused by ball-bearing faults. Results from employing time-frequency signal analysis methods to detect this fault are presented in this article.

Key words: Turbine flow meter, detection of faults, continuous Wavelet transform

INTRODUCCIÓN

La detección de fallas en medidores de flujo de tipo turbina usando técnicas de análisis de señal es una propuesta bien establecida en el panorama del estudio de estos medidores. Avances sustanciales en este tema pueden ser consultados.¹⁻⁴ Sin embargo, eventos específicos tales como las distorsiones del perfil de velocidad o los fallos de rodamientos no son identificables por las técnicas de análisis de señal empleadas hasta el momento.

Por otra parte, los fallos de rodamiento en otros mecanismos rotatorios han sido estudiados a través

del análisis de la señal vibración. Las técnicas tradicionales de análisis de señal basadas en técnicas temporales o espectrales no permiten un análisis multirresolución o multiescala, necesarios para la detección de patrones de fallas en estas señales de vibración de patrón de naturaleza no lineal.⁵

La salida de un TFM también posee información relacionada con el estado de funcionamiento de los rodamientos, pero esta se encuentra "enmascarada" en la salida de la señal debido al orden de escala de la frecuencia y la amplitud a las cuales la falla se manifiesta, comparado con las de la señal en sí.

La representación tiempo-frecuencia de la señal de salida de estos medidores representa una alternativa para lograr el mapeo detallado de la misma, así como para lograr el análisis de la evolución temporal de los eventos que en ella tienen lugar.

TRANSFORMADA WAVELET CONTINUA

La traslación de dominios ha sido un procedimiento matemático exitoso en el procesamiento de señales para obtener propiedades no explícitas en su dominio original. El análisis espectral basado en la transformada rápida de Fourier (FFT) es un ejemplo de esto, a partir del cual se logra obtener una valiosa información, no revelada en la representación del dominio temporal de una señal.

Sin embargo, el análisis espectral basado en FFT no permite una exploración multirresolución y multi-escala debido a las ventanas fijas de las funciones que estos métodos emplean para mapear la función en estudio. Estas características podrían ser necesarias cuando se requiere un análisis detallado de la señal.

Esta capacidad de análisis detallado es la principal ventaja del empleo de la CTW, la cual mapea una señal $x(t)$ usando una función ventana llamada (a,b) wavelet del siguiente modo:

$$C(b,a) = |a|^{-1/2} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \overline{\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)} dt \quad \dots (1)$$

donde:

a: Parámetro de dilatación (escala) que satisface

$$a \in \mathbb{R}^+ - \{0\}.$$

b: Parámetro de retardo, controla la posición relativa de $\psi(a,b)$ respecto a $x(t)$ y satisface $b \in \mathbb{R}$.

El término $|a|^{-1/2}$ preserva la energía de la función en su dominio original, una vez realizada la traslación al dominio tiempo-frecuencia. En una transformada Wavelet discreta (DWT), la ecuación 1 se mantiene válida, pero los parámetros a y b, satisfacen $a = 2^j$ y $b = k2^j$ para $j, k \in \mathbb{Z}$, respectivamente. Esta ecuación equivale a la integral de convolución de $X(t)$ y $\psi(a,b)(t)$, dada por:

$$C(b,a) = |a|^{-1/2} \int_0^{\infty} x(t) * \psi(a,b)(t) dt \quad \dots (2)$$

Las ventajas de la CWT comparada con otras herramientas espectrales basadas en la FFT, tales STFT, WVD, CWD y CSD se resumen a continuación:⁶

- Aceptable localización tiempo-frecuencia.
- Bajo índice de fuga entre la señal original y su representación.

- Baja interferencia de fase.
- Buena velocidad de cálculo.

PRUEBAS E INSTALACIONES EXPERIMENTALES

El trabajo experimental fue realizado empleando cinco medidores de 25,4 mm, como el mostrado en la figura 1. Estos medidores presentaron diferentes grados de daño provocado en sus rodamientos.



Flujómetro de turbina con conexión roscada y captador inductivo.

1

Este daño consistió en la deformación de sus esferas usando una mezcla viscosa de polvo abrasivo colocada en el interior de los rodamientos; posteriormente fueron sometidos a períodos de rotación de hasta 1,5 min. a velocidades de hasta 600 r/min.

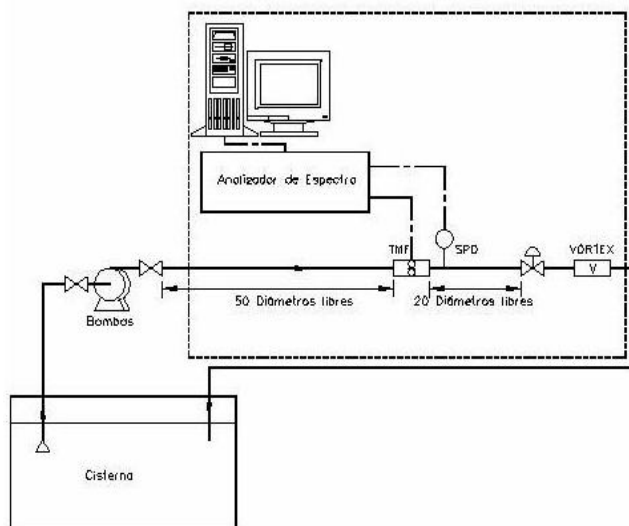
Se emplearon dos instalaciones experimentales. La primera fue destinada al cálculo del factor K de cada uno de los TFM antes y después de provocado el daño en los rodamientos de su rotor. El objetivo de esta prueba fue determinar la influencia de esta falla en el error del factor K de cada medidor. Para esta prueba fue empleado un calibrador volumétrico de tipo Piston Prover (figura 2).



Calibrador de tipo Piston - Prover usado para la determinación del factor K de los medidores.

2

La segunda instalación experimental fue empleada para adquirir las series de tiempo de la señal de salida de los TFMs a prueba, tanto en buenas condiciones como en condiciones de fallas. Esta señal fue muestreada con períodos de hasta $80\ \mu\text{s}$ para obtener su mejor descripción temporal. El circuito hidráulico de esta instalación se muestra en la figura 3.



Instalación experimental para adquisición de la señal de salida de los TFM.

3

Este circuito estuvo conformado por una cisterna de agua, bombas, cincuenta diámetros rectos aguas arriba del medidor y veinte diámetros libres aguas abajo del medidor a prueba, una válvula de control y un medidor vórtex de referencia.

El sistema de adquisición de datos empleado fue una computadora personal y un analizador de espectro. La señal de salida de los TFMs fue leída usando uno de los canales de entrada del mismo.

Los experimentos realizados incluyeron los análisis de las series de tiempo, el tiempo de cruce por cero de la señal, su análisis espectral a través del descriptor densidad de potencia espectral (PSD) y de su representación tiempo-frecuencia a través de la CWT.

RESULTADOS DE LOS EXPERIMENTOS

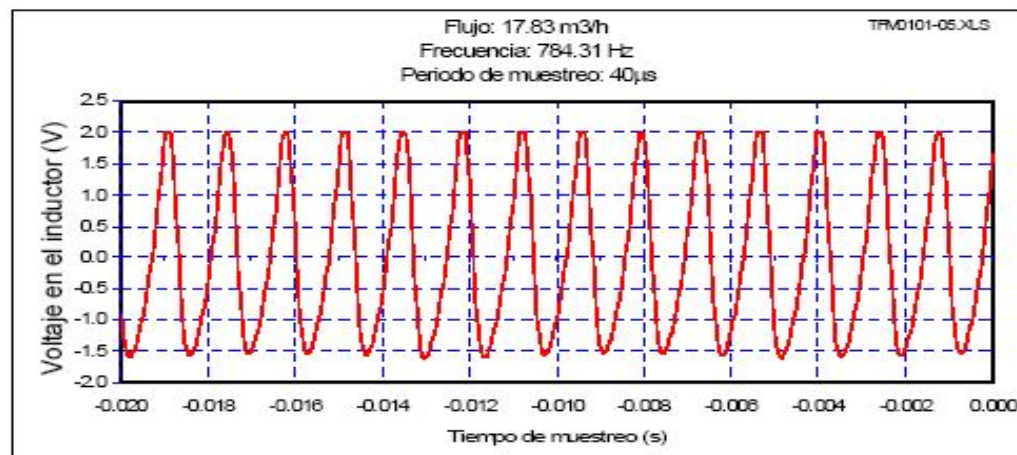
La figura 4 muestra los resultados del patrón de forma de onda de la serie temporal de un medidor en buen estado. En esta se exhibe un patrón de amplitud regular. Para el resto de los medidores ensayados se obtuvieron también patrones similares a este para todo el rango de trabajo de los mismos (30-300 lpm).

Una regularidad en los tiempos de cruce por cero de la señal de salida de los medidores fue observada también para todo el rango de medición de los TFMs en buen estado (figura 5).

Consecuentemente, las PSDs de las series temporales mostraron un patrón similar al de la figura 6, donde se observan claramente la frecuencia fundamental, así como su primer y segundo armónicos con potencias espectrales de de -14, -23 y -45 dB/Hz, respectivamente.

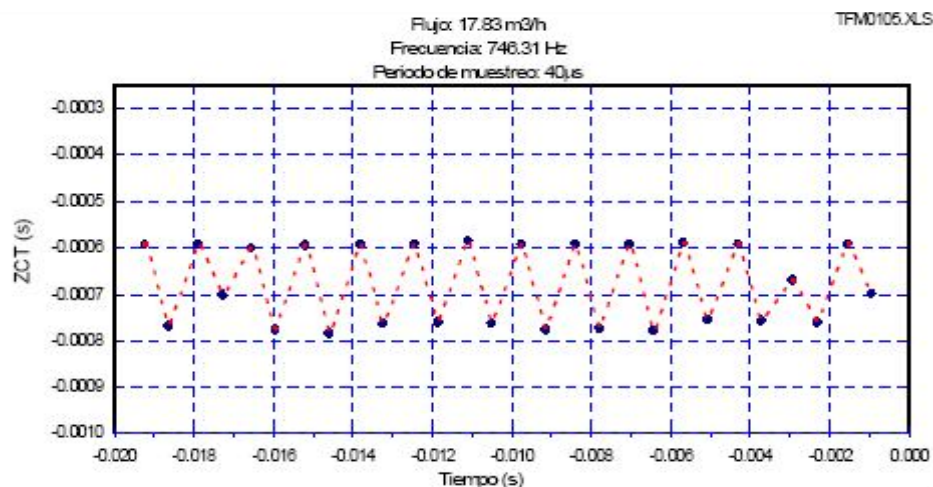
Por otra parte, la CTW de estas series de tiempo usando una función Morlet produjo escalogramas con regularidades en la distribución de sus coeficientes de correlación. Estos resultados revelan la ausencia de un comportamiento oscilatorio o la presencia de transientes en la señal (figura 7).

En condiciones de falla estas señales mostraron resultados diferentes al ser analizadas con las mismas técnicas.



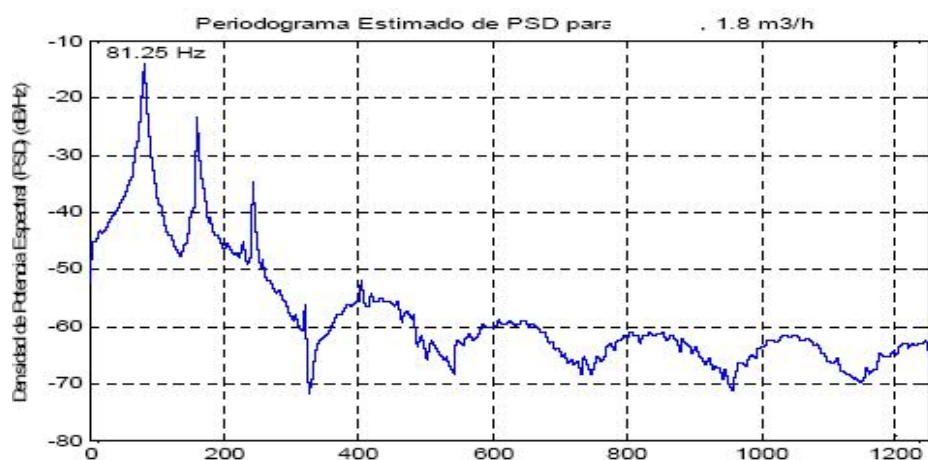
Serie de tiempo de un TFM en buenas condiciones.

4



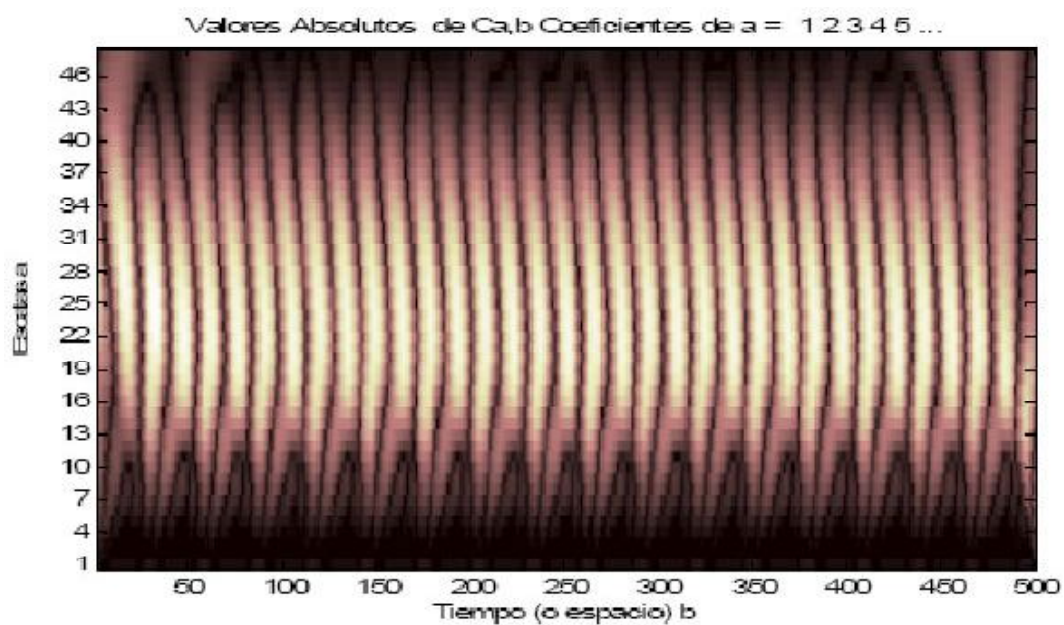
ZCT de la salida de un TFM en buenas condiciones.

5



PSD de la salida de un TFM.

6



CWT de la señal de salida un TFM en buenas condiciones.

7

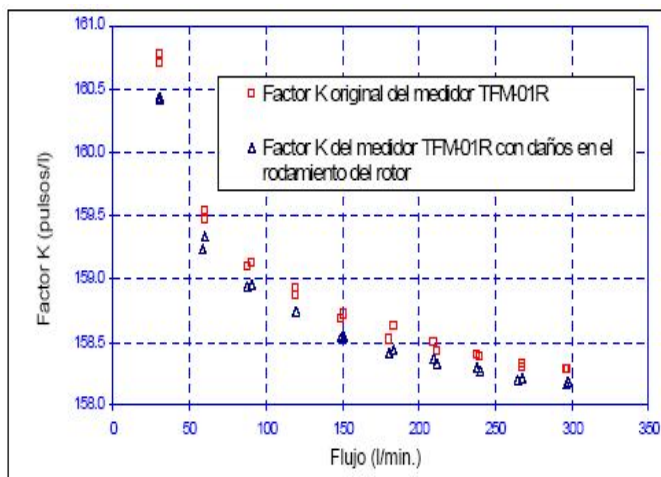
La determinación del factor K de los medidores después de provocada la falla en sus rodamientos reveló una variación relativa de hasta un 1 %, respecto a su valor original en buenas condiciones y para todo el rango de trabajo. Esta variación refuerza la influencia del estado funcional del rotor en el desempeño metrológico del medidor y la importancia de que esta falla sea predicha antes de que la calidad de la medición tenga una afectación mayor e irreversible.

Los ploteos de la serie de tiempo en condiciones de falla de los medidores ensayados (figura 9), revelaron una variación con un patrón semialeatorio, con una variación de su amplitud pico a pico del 1 - 3 %. Estos cambios en amplitud están relacionados con el movimiento irregular de las esferas, así como con el aumento desigual de las holguras en las cavidades de las esferas en los rodamientos.

Esta misma condición es la razón de la distribución de los tiempos de cruce por cero obtenidos (figura 10), los cuales tienen una dispersión mayor cuando se comparan con los obtenidos para buenas condiciones del mismo medidor.

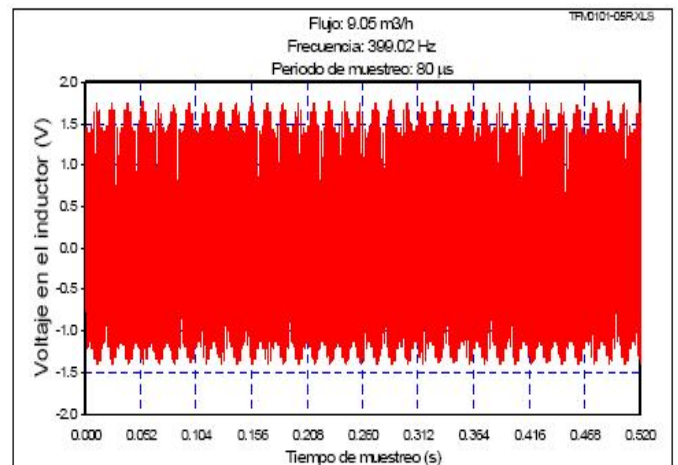
La representación de esta señal empleando una función wavelet Morlet a través de la CTW (figura 11), produjo escalogramas con una distribución de las celdas de resolución tiempo-frecuencia diferente a la obtenida en la figura 7, para buenas condiciones, revelándose diferencias irregulares en los coeficientes de correlación.

No obstante, las diferencias visuales no permiten una evaluación cuantitativa de la manifestación de la falla, esto sugiere el empleo de una herramienta matemática que permita el análisis numérico de lo sucedido.



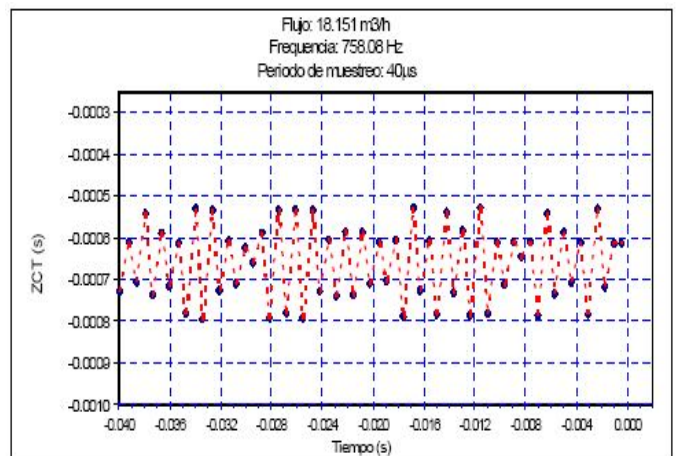
Factor K antes y después del daño provocado en los rodamientos.

8



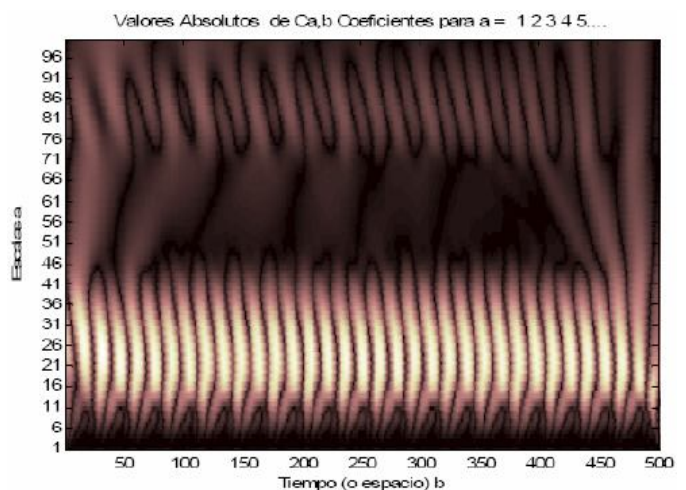
Señal de salida de un TFM en condiciones de falla.

9



ZCT de la salida de un TFM en condiciones de falla.

10



CTW de la señal de salida de un TFM en condiciones de falla.

11

Extracción de las características de falla

Con el objetivo de identificar claramente los cambios ocurridos en $C(b,a)$ en condiciones de falla, se empleó un método de análisis de singularidad.

La evaluación del exponente Lipschitz (α) es una aproximación válida para el logro de este objetivo. Dicho exponente puede ser visto como un refinamiento de la fórmula de aproximación de Taylor que ofrece un exponente no entero al término residual de una función $x(t)$ ajustada por una expresión polinomial (3).

$$x(t) = a_0 + a_1(t-t_0) + \dots + a_n(t-t_0)^n + A(t-t_0)^\alpha \quad (3)$$

donde:

P_n : Polinomio de orden n .

A : Coeficiente que satisface $A \in \mathbb{R}^+$.

El término $A|t-t_0|^\alpha$ será entonces elevado a un exponente no entero, α , conocido como exponente de Lipschitz,⁷ y también referenciado como exponente de Hölder.

Se asume un comportamiento singular de la función $x(t)$ analizada en un intervalo $[t, t_0]$ cuando α el calculado tiene valores cercanos a cero en ese mismo intervalo. La condición contraria de regularidad se asume si α se encuentra en la vecindad de la unidad.

Para el cálculo de α a partir de $C(b,a)$ tanto para condiciones de buen funcionamiento y para condiciones de falla se empleó un procedimiento propuesto,⁵ en este caso se aplicó la correspondencia entre DWT y CWT.⁸ Los valores obtenidos se muestran en la tabla 1.

DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Los valores de α expuestos en la tabla 1, muestran las diferencias entre las dos condiciones estudiadas. En el primer caso mantiene valores alrededor de 0,814 en la vecindad de la unidad. Por otra parte en condiciones de falla este mismo valor va desde 0,621 a 0,257; estas cifras muestran la existencia de un comportamiento singular en los segmentos analizados de la señal de salida de los medidores.

El valor umbral de α considerado para definir el comportamiento singular o regular fue tomado como 0,5. No fueron encontradas referencias específicas relacionadas con el valor de α a partir del cual el comportamiento del segmento analizado debe ser o no tomado como singular. Sin embargo, si se asume una distribución uniforme de este exponente el valor tomado resulta aceptable.

CONCLUSIONES

El estudio demuestra que es posible encontrar una descripción consistente para los fallos de rodamientos en la señal de salida de un TFM. Aunque la señal de salida de un TFM es básicamente una señal periódica y estacionaria, esta investigación confirma que en estas condiciones de falla, esta puede ser deformada de manera que aparezcan segmentos no estacionarios representados por picos.

Debido a las diferencias en el orden de sus escalas de amplitud y frecuencia estas no son detectables en la representación temporal o espectral de la señal. La CTW ofrece un método para obtener el filtraje necesario a la señal para poder caracterizar su comportamiento singular o no, en este caso, a través de la evaluación del exponente de Lipschitz.

Tabla 1
Promedio de los valores del exponente de Lipschitz calculados

Flujo (m ³ /h)	Frecuencia fundamental (Hz)	α calculada para $j=1\dots 6$	
		Sin fallo	Con fallo
1,8	81,2	0,831	0,621
5,2	231,9	0,822	0,401
9,0	399,0	0,827	0,268
14,2	627,1	0,789	0,243
17,7	734,3	0,801	0,257

La aplicación de este resultado permite el diseño de sistemas automatizados de detección de fallas en TFMs, contribuyendo a la optimización de los ciclos de mantenimiento de estos medidores de flujo y sobre todo a garantizar que los mismos operen dentro de los rangos permisibles de error, con el consecuente impacto económico que esto representa.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al profesor doctor Marcos Tadeu Pereira y al equipo de trabajo del Centro de Metrología de los Fluidos del Instituto de Pesquisas Tecnológicas del Estado de São Paulo, por su apoyo y cooperación en esta investigación.

REFERENCIAS

- 1. Echendu, J. E. and E. H. Higham:** "Additional Information from Flow Meters Via Signal Analysis", IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement, 39 (6):998-1003, 1990.
- 2. Echendu, J. E and P. J. Hurren:** "Identification of Process Plant Signatures Using Flow Measurement Signal," IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement, 39 (2): 416-420, 1990.
- 3. Pusayatanont, M.; E. H. Hugham and P. J. Unsworth:** Analysis of the Sensor Signal from a Turbine Flow Meter to Recover Information Regarding the Flow Regimes International Conference on Flow Measurement, FLOMEKO, Groningen, The Netherlands. Proceeding 2003
- 4. Xu, P.:** Condition Monitoring of Turbine Flow Meters and Flows Regime Using Sensor Signal Analysis. Dissertation Submitted for the Degree of Master in Philosophy, University of Sussex, UK, 2005
- 5. Fu, Y; W. W. Li and G. H. Xu:** Wavelet and Singularities in Bearing Vibration Signals. Proceedings of 2nd International Conference on Machine Learning and Cybernetics, Xi'an, 25 November, 2003.
- 6. Young, K. and R. Wavelet:** Theory and Applications. Kluwer Academic Publisher, Massachusetts, 1998.
- 7. Robertson, A. N.; C. R. Farrar and Sohn, H.:** Singularity Detection for Structural Health Monitoring Using Holder Exponents. Mechanical Systems and Signal Processing, 17 (6): 1163-1184, 2003.
- 8. Mallat, S.:** A Wavelet Tour of Signal Processing, Academic Press, New York, 2nd. Ed., 1999.

AUTORES

Osmel Reyes Vaillant

Ingeniero en Control Automático, Doctor en Ciencias Técnicas, Dirección Técnica de CUPET para

Automática y Metrología, Ciudad de La Habana, Cuba, Miembro del Comité Técnico de Normalización de la ONN y del Subcomité de Volumen
e-mail:osmel@union.cupet.cu.

Jesús Cabrera Gómez

Ingeniero Mecánico, Doctor en Ciencias Técnicas, Investigador, Centro de Estudios de Ingeniería del Mantenimiento (CEIM), Facultad de Ingeniería Mecánica, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cujae, Ciudad de La Habana, Cuba, Miembro del Comité Técnico de Normalización de Vibración y Acústica
e-mail:jcabrera@ceim.cuajae.edu.cu

SIGLAS

- CWD: Distribución Choi-Williams
CSD: Distribución cónica
CWT: Transformada Wavelet continua
DWT: Transformada Wavelet discreta
FFT: Transformada rápida de Fourier
PSD: Densidad de potencia espectral
STFT: Transformada de Fourier de tiempo corto
TFM: Medidor de flujo de tipo turbina
WVD: Distribución Wigner-Ville
ZCT: Tiempo de cruce por cero de una señal $x(t)$



EL CIER es la Conferencia Internacional de Energía Renovable, Ahorro de Energía y Educación Energética que se celebra en Cuba cada dos años, ahora en su sexta edición.

La misión del CIER es brindar un espacio para compartir experiencias y crear sinergias entre científicos, profesionales, empresarios y otros especialistas frente al reto de lograr una cultura energética sostenible.

El evento es organizado por el Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (Cujae), de La Habana, con su Centro de Estudio de Tecnologías Energéticas Renovables (CETER), quienes convocan al mismo junto a la Universidad Técnica de Energía Renovable (UTER) del Ministerio de Educación Superior y el Grupo Nacional de Energía Renovable, Cogeneración, Ahorro y Eficiencia Energética.

Fecha de desarrollo del evento: 9-12 de Junio 2009, en Palacio de las Convenciones de La Habana, Cuba

Dirección del evento en Internet: <http://www.ciercuba.com/>