

Identificación experimental de patrones de falla en flujómetros del tipo turbina.

O. Reyes Vaillant*, **J. Cabrera Gómez ****.

* Dirección técnica CUPET. Cuba.

E-Mail: osmel@union.cupet.cu

** Centro de Estudios en Ingeniería de Mantenimiento. CUJAE. Cuba.

E-Mail: jcabrera@ceim.cujae.edu.cu

(Recibido el 11 de Julio 2006; aceptado el 14 de Noviembre de 2006)

Resumen.

En el presente trabajo se investigan las manifestaciones de las fallas más comunes que ocurren en los medidores de flujo de tipo turbina (TFM), a través del análisis de su señal de salida. Además del empleo de técnicas clásicas de análisis de señal en los dominios temporal y espectral, se prueba, por vía experimental, nuevas aproximaciones al análisis de esta señal a través de representaciones multi-escala y multi-resolución empleando la transformada *wavelet* continua (CWT) en el plano tiempo-frecuencia. Estos resultados serán empleados finalmente, para el diseño de un sistema de diagnóstico para estos medidores utilizando algoritmos que contienen los métodos de análisis propuestos.

Palabras claves: Flujómetro tipo turbina, patrones de fallas, análisis digital de señales, transformada wavelet.

1. Introducción.

El procesamiento de señales obtenidas en sistemas electro-mecánicos rotatorios ha sido objeto de diversas investigaciones en las últimas décadas ^[2, 5, 16], las que han permitido la modelación del funcionamiento de estos sistemas para la mejora de su diseño y la detección de posibles fallas en su funcionamiento. En dichas investigaciones, han sido utilizadas diferentes técnicas de monitoreo con la inclusión de varios métodos de representación, pre-procesamiento, análisis de señal, reconstrucción y extracción de patrones de las señales procesadas.

Los medidores de flujo tipo turbina (TFM), como sistemas rotatorios, han sido estudiados también con anterioridad [1, 8, 17, 20]. Este tipo de medidor (ver Figura 1), con un uso extendido fundamentalmente en la industria del petróleo, posee como salida una señal eléctrica alterna, periódica y de bajo nivel de voltaje, cuya frecuencia es proporcional a la velocidad de la corriente de flujo que se mide.

En los trabajos publicados hasta la actualidad no se ha propuesto un método general de análisis de los patrones de falla que se manifiestan en la señal de salida de estos medidores, que permitan implementar procedimientos de diagnóstico para estos instrumentos de medición. Las técnicas utilizadas hasta hoy no facilitan identificar la manifestación en la señal de la salida de todas las fallas

que alteran el desempeño metrológico de estos medidores. Esto es más evidente en fallas asociadas al estado funcional de los rodamientos del rotor de un TFM, y en las que son resultado de distorsiones hidrodinámicas del perfil de velocidad de la corriente de flujo que se mide. La manifestación de estas dos fallas terminan siendo elementos no detectables por técnicas clásicas de análisis de señal (temporales o espectrales).

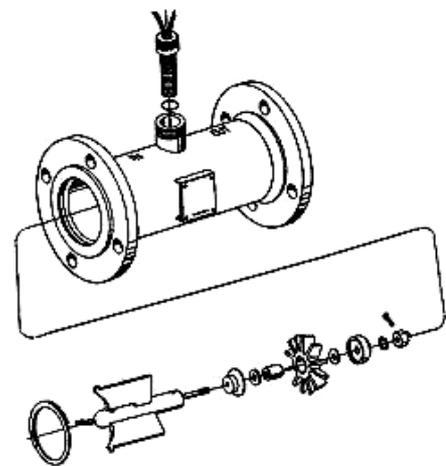


Figura 1. Medidor de flujo tipo turbina.

En el presente trabajo se exponen los resultados del empleo de nuevas técnicas de análisis de señal para identificar la manifestación, en la señal de salida del medidor de flujo tipo turbina. Estos resultados serán parte de un proyecto de investigación que propone el diseño de un sistema de diagnóstico para TFM.

2. Antecedentes.

La evolución de las investigaciones acerca de la dinámica de los TFM tiene su punto de partida en trabajos que permitieron establecer las características generales de un medidor tipo turbina, considerando su geometría y los efectos del perfil de velocidad de la corriente de flujo [19]. Posteriormente se estableció el planteamiento matemático de los aspectos fundamentales que permiten la modelación dinámica del sistema TFM-corriente de flujo [3, 4, 9], la que ha seguido perfeccionándose por diversos investigadores [17, 20], aumentando la comprensión del fenómeno físico con vistas a mejorar el diseño de los medidores.

Para obtener información sobre el comportamiento de un TFM en condiciones de falla, se ha investigado la correlación existente entre la duración de los pulsos de salida del medidor y la deformación geométrica de las aletas del rotor en los dominios del tiempo y la frecuencia [10]. Fue comparada la salida de un TFM, con una señal generada por un modelo fenomenológico del mismo, tanto para condiciones normales, como en presencia de fallas provocadas [9]. Los resultados obtenidos mostraron valores de coincidencia para los diferentes grados de severidad de las fallas. Se reportan otros trabajos acerca de la dependencia entre factores geométricos del medidor y la variabilidad de su señal de salida [6].

Se ha trabajado en la identificación de condiciones de fallas en TFM a través de la recuperación de información adicional contenida en su señal de salida [17], para varias fallas asociadas a irregularidades del rotor o a condiciones externas de la corriente de flujo. Los resultados han mostrado correspondencia entre algunas fallas y la modificación, tanto en el dominio espectral y/o temporal de la señal de salida del medidor, especialmente las variaciones dimensionales de las aletas del rotor. En otras fallas tales como la variación del ángulo de *chamfer* de una aleta, las perturbaciones en el perfil de velocidad de la corriente o la degradación mecánica de los rodamientos, no se han identificado comportamientos consistentes en la señal de salida asociables a estas fallas.

Las más recientes investigaciones han estado dirigidas a analizar la respuesta dinámica de pequeños TFM para gases y líquidos, así como el comportamiento del error debido a *over-readings* en fluidos de baja densidad [13].

En las referencias comentadas anteriormente no aparecen investigaciones que relacionen el análisis de la señal de salida de un TFM con la existencia de dos de las fallas más comunes que lo afectan. La causa de esa ausencia está relacionada a diversos aspectos, entre ellos, la baja inercia de masa del rotor, la pobre influencia de la potencia del “ruido” del rotor e, incluso, de los efectos deformadores del perfil de velocidad de la corriente de flujo, con respecto a la potencia de la señal de salida propiamente dicha, resultando finalmente que las fallas quedan enmascaradas en la señal de salida, apareciendo armónicos de muy baja potencia con acoplamiento de fases convolucionados con la señal fundamental [11, 12].

También ha sido considerada la relación existente entre la posición de la frecuencia natural y la de los armónicos fundamentales de una señal vibratoria de un sistema mecánico rotatorio, así como el desplazamiento de esta frecuencia a partir de un cambio en las condiciones de operación del mismo. El análisis fue implementado utilizando filtros con transformada *wavelet* continua (CWT). La CWT es la herramienta empleada para la detección de fallas en una turbina generadora, a través del monitoreo de las vibraciones torsionales [14]. Sobre la base de la CWT, se ha podido diseñar un sistema de diagnóstico que emplea una función madre de tipo Morlet, para extraer la envolvente de una señal vibratoria. En el contexto del análisis de la señal de salida de un TFM, la CWT no ha sido utilizada, aunque ha sido considerada como una posibilidad inexplorada [18, 20].

Las referencias citadas evidencian, más allá de la escalabilidad en amplitud y tiempo/frecuencia, la principal capacidad del método en el contexto de este trabajo: el mapeo detallado de todos los elementos presentes en una señal $x(t)$ y consecuentemente su eventual reconstrucción.

3. Obtención de patrones de falla de un TFM.

A continuación se expone la manifestación de las fallas más importantes que afectan al sistema TFM-corriente de flujo, así como su expresión en los dominios temporales, espectrales y eventualmente en el plano tiempo-frecuencia.

3.1. Instalación experimental.

La instalación experimental empleada para la obtención de los patrones de falla, consistió en un circuito hidráulico cuyas características se muestran en la Figura 2 y Tabla 1.

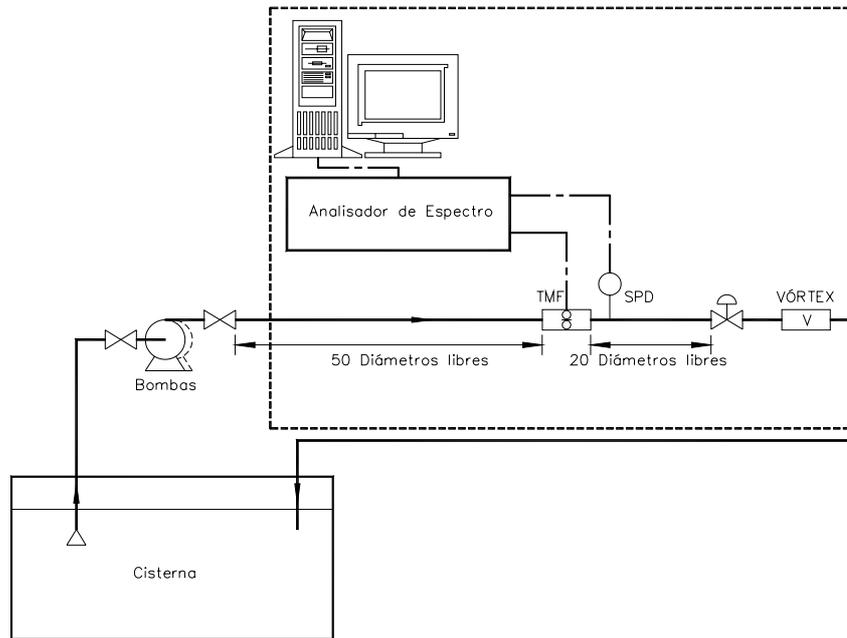


Figura 2. Diagrama de la instalación experimental empleada.

Tabla 1. Características de la instalación experimental empleada.

Elemento	Descripción
Máquina de flujo empleada:	Bomba centrífuga 15HP
Control de flujo:	Válvula de globo con accionamiento manual ($\phi 25,4 \text{ mm}$)
Rango de flujo:	0 - 40 m^3/h
Rango de presión:	0 - 10 kgf/cm^2
Fluido de trabajo:	agua
Flujómetro de referencia:	VFM $\phi 4''$, Yokogawa Modelo: YFK-0101
Tramos rectos aguas arriba del medidor:	50 diámetros
Tramos rectos aguas abajo del medidor:	20 diámetros
Enderezador de flujo empleado:	Placa modelo MITSUBISHI ($\phi 25,4 \text{ mm}$)
Generador de distorsiones del perfil	Dos codos de 90° en planos diferentes

Se emplearon cinco muestras de TFM, uno en estado normal de funcionamiento (TFM-01) y el resto con daños provocados. Las características de los medidores empleados aparecen en la Tabla 2. Las fallas provocadas a los medidores, o al sistema TFM-corriente de flujo son:

- cambios en el ancho de una aleta (TFM-02)
- modificación del ángulo radial de aleta (TFM-03)
- cambios en la longitud de aleta del rotor (TFM-04)
- deterioro de los rodamientos del rotor (TFM-01R)
- deterioro del perfil de velocidad del flujo (TFM-02P)

Tabla 2. Características principales de los medidores de tipo turbina ensayados.

Característica	Valor
Diámetro:	25,4 mm
Número de aletas:	6
Rango de flujo:	1.8 - 18 m^3/h
Tipo de unión a tubería de proceso:	roscada
Tipo de elemento captador:	Inductivo
Repetibilidad:	0.15 % FS
Linealidad:	0.25 % FS

3.2 Patrones de falla obtenidos.

A continuación se muestran los patrones obtenidos para las cinco fallas estudiadas. Estos patrones fueron obtenidos empleando las siguientes técnicas:

- análisis de la serie temporal
- análisis espectral
- análisis ZCT
- análisis tiempo-frecuencia.

La identificación de los patrones de fallas se realizó comparando el resultado de los análisis anteriores, obtenidos para cada medidor en buen estado de funcionamiento y el obtenido posteriormente con la falla provocada. En las Figuras 3 y 4, se muestran, respectivamente, la serie temporal y el análisis de ZCT del TFM-01, para condiciones de no fallas consideradas como condiciones de referencia.

Los umbrales de falla, o sea, el criterio a partir del cual se consideró que la variación del factor K del

medidor provoca perturbaciones en su característica metrológica, fue adoptado a partir de un trabajo previamente publicado [15], considerando una falla influyente cuando esta provoca una variación del factor K mayor que $\pm 0.05\%$ de su valor máximo. La cuantificación de la variación del factor K de cada medidor antes y después de operadas las modificaciones fue realizada determinando este factor con el empleo de un patrón volumétrico de tipo *Piston Prover* (ver Figura 5). Seguidamente se muestran los resultados obtenidos para las fallas estudiadas.

De las tres fallas asociadas a deformaciones geométricas del rotor, provocadas por erosión, impacto de partículas sólidas en sus aletas u otras razones, dos de ellas (**b** y **c**) mostraron patrones consistentes en la señal de salida, tanto en la serie temporal, como en la representación espectral de estas señales, así como en el comportamiento de los valores de ZCT, ver Figura 6.

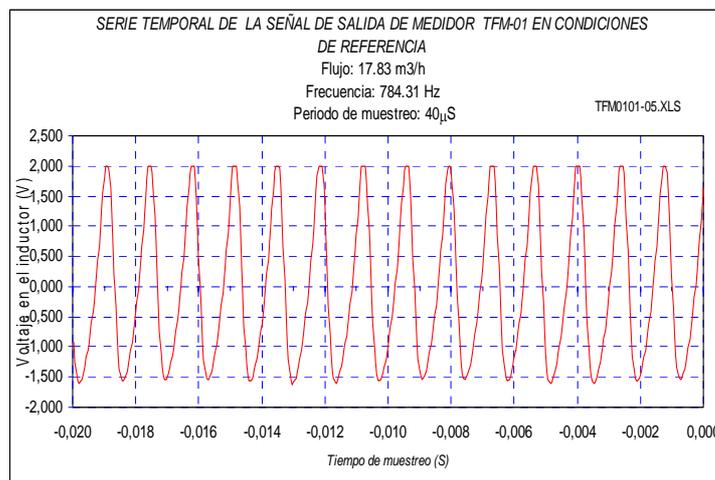


Figura 3. Serie temporal de la señal de salida de TFM-01.

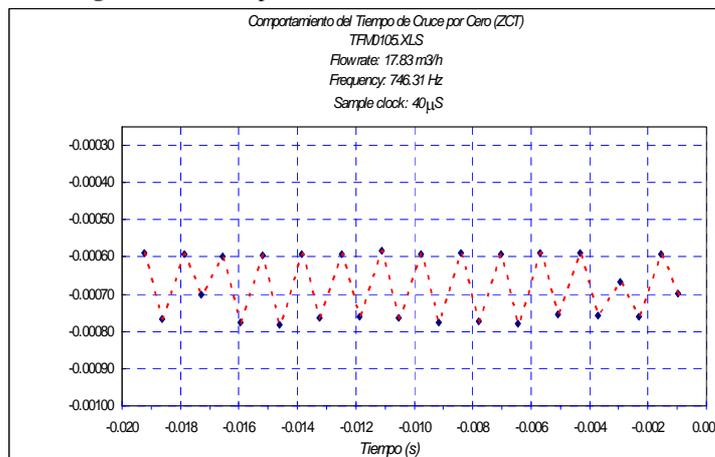


Figura 4. Tiempo de cruce por cero de la señal de salida de TFM-01.



Figura 5. Piston Prover empleado en la cuantificación de la variación del factor K de los medidores ensayados.

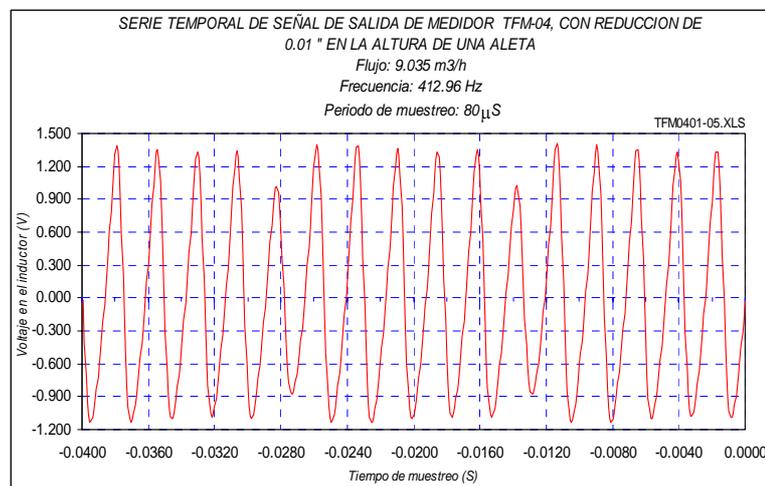


Figura 6. Serie temporal de la señal de salida de TFM-04.

En la Figura 6 se observa la modulación periódica que exhibe la serie temporal de TFM-04, provocada por la disminución de 0.254 mm en la longitud de una aleta de su rotor (falla *c*).

Este efecto se aprecia en el análisis espectral de esta misma señal, con la aparición de una frecuencia igual a $5/6$ de la frecuencia fundamental del medidor para el valor medido de 655.1 Hz, (Ver Figura 7).

Para esta falla se obtuvo una dispersión mayor en el ZCT, debido al desbalance provocado en el rotor. La variación de este parámetro se hace notar comparando la Figura 8 (TFM-04) con la Figura 4 (TFM-01).

La falla *b* se manifiesta de manera equivalente a la *c*, pues un desvío angular de una aleta del rotor es captado en el elemento inductor como un alejamiento del extremo de la aleta al dipolo. Esto disminuye la amplitud de la señal inducida en el sexto pulso, aunque

la disminución en este caso es menor que la provocada por la falla *c* (ver Figura 9). La manifestación de esta falla en el PSD de su señal de salida es similar a la falla *c*. Sin embargo, la falla *a*, no fue detectada por ninguno de estos métodos de análisis. No obstante, el valor de variación del factor K no fue superior al umbral mínimo definido, por lo que la falla deja de tener interés en este trabajo.

Por otra parte, las fallas *d* y *e* mostraron valores de variación del factor K relevantes, pero al mismo tiempo no fueron detectados patrones consistentes, ni en la serie temporal ni en el PSD de la señal de salida, así como tampoco se identificó consistencia en la dispersión del ZCT. En ambas fallas aparece alguno de los aspectos enunciados en trabajos precedentes [11, 12].

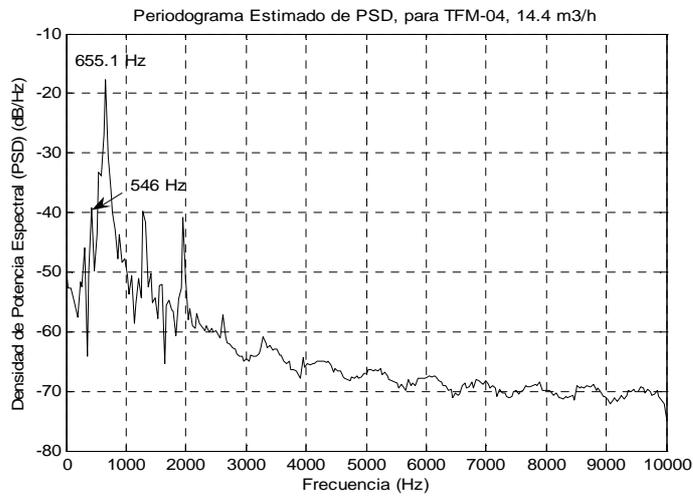


Figura 7. PSD de TFM-04: se observa un sub-armónico (5/6 fo) de -39 dB.

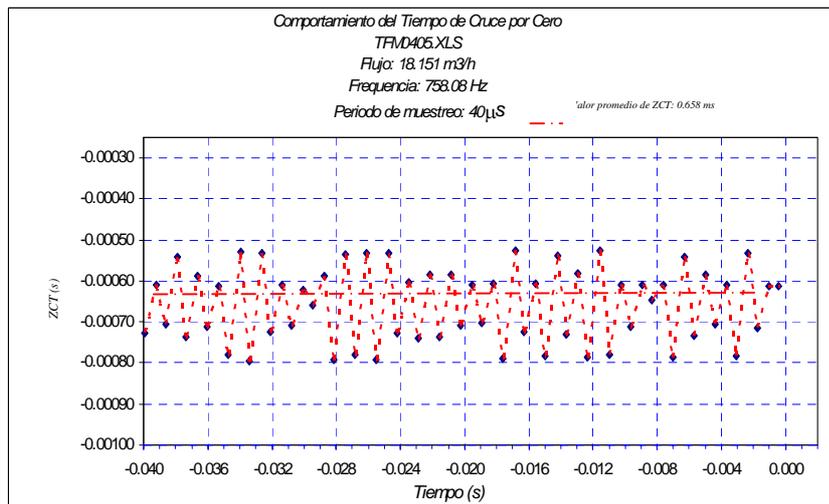


Figura 8. ZCT de la serie temporal de la señal de salida de TFM-04.

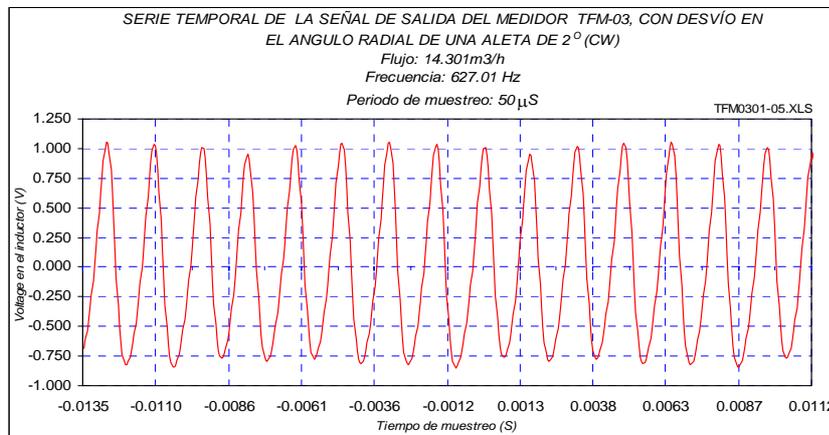


Figura 9. Serie temporal de la señal de salida de TFM-03.

En el caso d , se encuentra la afectación a la integridad de los rodamientos, tema abordado por varios investigadores para otros sistemas rotatorios, a través de la representación tiempo-frecuencia (TFR), empleando las descripciones obtenidas de algunas de las variantes disponibles de la transformada *wavelet*. También en el caso e , el movimiento del rotor está influenciado por la acción de un campo de velocidad de la corriente de flujo deformado, con un aumento considerable del índice de vorticidad de la corriente de flujo.

3.3 Análisis por métodos TFR.

La transformada *wavelet* constituye una de las herramientas más versátiles y efectivas entre los métodos actuales de representación tiempo-frecuencia. Esta transformación lineal consigue la traslación de dominios de una señal hacia coordenadas tiempo-frecuencia, empleando como ventanas un conjunto de funciones llamadas *wavelets*, $\psi_{a,b}(t)$. Esto se expresa de modo general como:

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

Donde a es un parámetro de escala que cambia con la frecuencia de la señal y que satisface $a \in \mathfrak{R}^+ - \{0\}$. El parámetro b es un retardo que controla la posición relativa de la función respecto a $x(t)$ y que satisface $b \in \mathfrak{R}$. La Ecuación 1 describe la integral de convolución de $x(t)$ y $\psi_{a,b}(t)$, es decir:

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

Las propiedades requeridas por una función para ser empleada como *wavelet* (admisibilidad) han sido discutidas con anterioridad [21].

En general se puede establecer que $\psi(\cdot)$ tendrá que satisfacer las cuatro condiciones siguientes:

- I. La función será oscilante y de energía finita
- II. La función evaluada para $\omega = 0$ será igual a cero
- III. La función evaluada para $\omega = \infty$ será igual a cero
- IV. La función tendrá rápida atenuación a cero en el eje del tiempo

El parámetro $|a|^{-1/2}$ en las ecuaciones (1) y (2) garantiza preservar la energía del sistema descrito para satisfacer el criterio de admisibilidad. Finalmente, la CWT es descrita como un producto escalar en el espacio de Hilbert con norma L^2 , de la forma:

$$C(b, a) = \langle \psi(a, b), x_{(t)} \rangle = |a|^{-1/2} \int_0^{\infty} x_{(t)} * \psi(a, b) dt \quad (3)$$

Por otra parte, la representación gráfica de esta transformada se realiza con un escalograma que distribuye células de resolución tiempo-frecuencia en un plano de escala vs. traslación. Estas células van ocupando áreas que incrementan su ancho y disminuyen su altura, en el sentido del eje y . Su razón ancho-altura está en consonancia con el patrón de incremento de base dos (*diádica*), como se muestra en la Figura 10. Un escalograma predefine una gradación de tonos de color que representan el valor de correlación de cada célula (función *mother-wavelet*, con escala y traslación definida) respecto a la señal analizada. En este caso y considerando las características de la señal a ser analizada, se emplearon dos funciones *wavelet* para el mapeo de la señal de salida de los medidores TFM-01R y 02A. La primera función empleada fue una *db 5*, de la familia Daubechies y la segunda una función Morlet. Las formas de onda de estas *mother-wavelet* se muestran en la Figura 11.

Se muestra en las Figuras 12 y 13 el resultado de la CWT para la señal del medidor TFM-01 considerado como condición de referencia. Las transformaciones se realizaron sobre la serie temporal mostrada en la Figura 3, obteniéndose un escalograma definido, sin interferencias de fase, independientemente del retardo aplicado o el nivel de escala analizado, o incluso del tipo de *mother-wavelet* empleado.

En la figura 14, se muestra la transformada continua de wavelet para la señal de salida de TFM-01R. La falla provocada en este medidor consistió en un desgaste irregular en las esferas del rodamiento del rotor (d). El patrón obtenido a través de la CWT muestra una redistribución de los coeficientes de correlación $C(b, a)$, modificándose este patrón para los diferentes valores de b . Este comportamiento se corresponde con los resultados obtenidos en otros trabajos donde se investigan fallas en rodamientos, obteniéndose, en esos casos la CWT a partir de una señal vibracional [7].

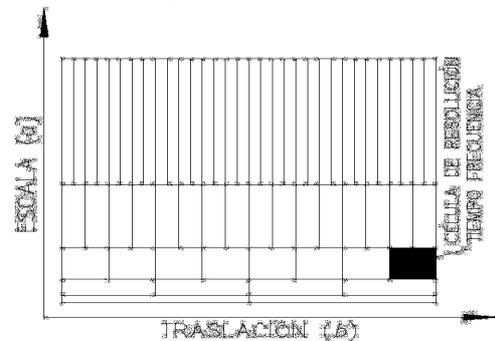


Figura 10. Escalograma: representación gráfica de una DWT (YOUNG, 1998).

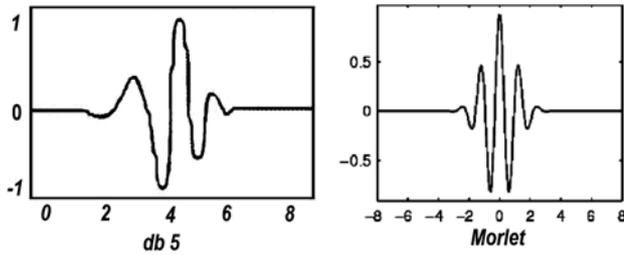


Figura 11. Función ψ de las familias Daubechies (db 5) y Morlet, empleadas en el análisis CWT realizado.

La CTW de la señal de salida de TFM-02P, para la falla e arrojó una composición mantenida en los cinco puntos de flujo donde se realizaron los ensayos, con un patrón alrededor de lo mostrado en la figura 15. En esta falla se manifiestan los efectos de aumento de la vorticidad de la corriente de flujo y las distorsiones del perfil de velocidad.

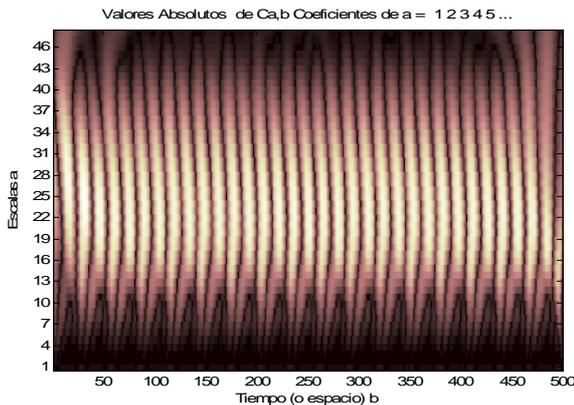


Figura 12. CWT de TFM-01, empleando la función Daubechies (db 5).

A pesar de la naturaleza estocástica de los fenómenos turbulentos, se observa cierta periodicidad en la deformación observada en el escalograma. Esto se explica, porque de cualquier modo la forma en que se han obtenido la manifestación de la falla ha sido a través de una señal oscilatoria.

4. Conclusiones.

El empleo de técnicas de análisis de señal basadas en representaciones tiempo frecuencia, especialmente la transformada wavelet continua, permitió identificar patrones de fallas asociados a desperfectos funcionales de los rodamientos del rotor, así como a condiciones no adecuadas del perfil de velocidad, necesarias en todo flujómetro inferencial.

La identificación de los patrones de manifestación de estas dos fallas constituye el fundamental resultado de este trabajo.

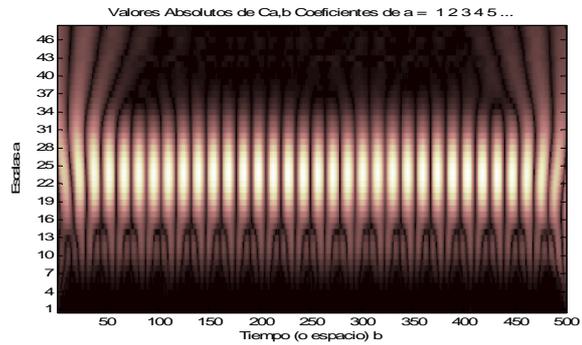


Figura 13. CWT de TFM-01, empleando una función Morlet.

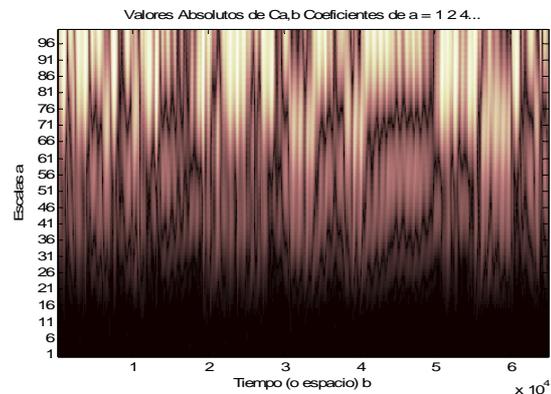


Figura 15. CWT de TFM-02P, empleando función Morlet.

Aunque el alcance del presente trabajo no incluyó el análisis de singularidades de las matrices $C(b,a)$ obtenidas a través de las CWT, se impone obtener la descripción numérica de estas fallas. Estos valores complementarán las entradas y las referencias del clasificador de fallas que conformará el sistema de diagnóstico de TFMs que constituye la conclusión del proyecto del cual este trabajo constituye una parte.

Agradecimientos.

Al Dr. Marcos Tadeu Pereira, Director Ejecutivo del Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) del Estado de São Paulo, Brasil, y al equipo técnico del Centro de Metrología de los Fluidos (CFM) de ese Instituto, por la guía y el apoyo brindado, sin los cuales este trabajo no habría podido desarrollarse.

5. Referencias.

- [1] AJAYI, A. *An investigation into using SFT to monitor turbine flowmeter*. Dissertation of Master in Engineering. University of Bradford, UK. 1983.
- [2] ARETAKIS, N; MATHIOUDAKIS, K. *Classification of radial compressor faults using pattern*

recognition. *Control Engineer Practice*. 1998: (6) 1217-23.

[3] BAKER, R. *Turbine flowmeters: II. Theoretical and experimental published information*. *Flow Meas. and Instrument*. 1993: 4 (3) 123-144.

[4] BLOWS, L. G. *Toward a better turbine flowmeter*. International Conference on Advances in Flow Meas. Techniques. BHRA Cranfield. 1991:307-318.

[5] BRAUN, S. *9th Biennial Conference on Mechanical Vibration and Noise*. ASME, 1983.

[6] CHEESEWRIGHT, R; BISSET, D; CLARK, C. *Factors which influence the variability of turbine flowmeter signal characteristics*, *Flow Meas. and Instrument*, 1998: 9 (2) 83-89

[7] DALPÍAZ, G; RIVOLA, A. *Condition monitoring and diagnostics in automatic machines: comparison of vibration analysis techniques*. *Mechanical Systems and Signal Proc.* 11 (1) 53-57. 1997.

[8] ECHENDU, E; HIGHAM, E. *Additional information from flowmeters via signal analysis*. *IEEE Trans. on Instrument. and Meas.* 1990: 39 (6) 998-1003

[9] ECHENDU, E; ZHU, H. (1992) *On monitoring the condition of TFM*. *IEEE T. I. & M.* 1992: 41 (1): 102-106

[10] ECHENDU, E; HURREN, J. *Identification of process plant signatures using flow measurement signal*. *IEEE Trans. on Instrument. and Meas.* 1992: 39 (2): 416-420

[11] HIGHAM, E. *Experimental testing for KDG turbine meters*. *University of Sussex, UK*. Report No. USME/94/07. 1994.

[12] HIGHAM, E. *Prof.(r) Esc. Ing. Univ. Sussex, UK*. Comunicaciones personales. 2004.

[13] LEE, B. R; CHEESEWRIGHT, R; CLARK, C. *The dynamic response of small TFM in liquid flows*. *Flow Meas. and Instrument*. 2004:15 (6) 239-248

[14] LI, WEN; LI, C. *Application of wavelet packet analysis for fault detection in electro-mechanical system based on torsional vibration measurement*. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2002: 1517 doi:10.1006/mssp.2002.517

[15] LUXHØJ, T. *Artificial neural network for non-linear estimation of TFM coefficients*. *Engineering Application of Artificial Intelligence*. 1998: 11 6: 723-734

[16] PARKER, B; WARE, A; WIPE, P; TOMPKINS, R; CLARK, R. *Fault diagnostics using statistical change detection in bi-spectral domain*. *Mechanical Systems and Signal Proc.* 2000: 14 (4) 561-570

[17] PUSAYATANONT, M. *Multiphase flow measurement based on conventional flow meters using signal analysis*. Thesis submitted for the Degree of Doctor in Phil., Univ. of Sussex, UK, 2003

[18] PUSAYATANONT, M. *Profesor del Dep. de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad de Ubonratchatani, Tailandia*. Comunicaciones personales, 2005.

[19] TSUKAMOTO, H; HUTTON, S. P. *Theoretical prediction of meter factor for a TFM*. Conference on Fluid Control & Meas. Tokyo, Japan, 1985

[20] XU, P. *Condition monitoring of TFM and flows regime using sensor signal analysis*. Dissertation of Master in Phil. University of Sussex, UK, 2005

[21] YOUNG, K. R. *Wavelet: Theory and Applications*. Kluwer Academic Pub. Massachusetts, 1998

[22] YUH-TAY, Sh. CHUN-KAI, H. *Constructing a wavelet-based envelope function for vibration signal analysis*. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2004: 18 119-126.

Experimental identification of failure patterns in turbine type fluxmeter.

Abstract.

The most common manifestations of failures in turbine flow meters (TFM) are investigated through the analysis of their output signal. Classic techniques of analysis in time and spectral domains are used and also new approaches to the analysis of the TFM output signal are presented by means of multi-scale and multi-resolution representations using the Continuous Wavelet Transform (CWT) in a time-frequency plot. These results will be employed in order to design a diagnostic system for TFMs using algorithms containing the proposed analysis methods.

Key words: Turbine flow meter, pattern of failure, signal analysis, wavelet transform.