

Aplicación de la Transformada Continua de Wavelet en Señales Ultrasónicas

Maganda Carvajal Jaime Alberto y Rubio González Carlos

Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI)
Pie de la Cuesta 702, Desarrollo San Pablo, C.P. 76130, Querétaro, Qro.

Resumen

En el mundo existen plenamente identificadas 3 millones de kilómetros de tuberías de aceite y gas aproximadamente, debido a la necesidad energética cada vez mayor, esta longitud aumenta anualmente 25,000 kilómetros. Hoy las tuberías se hacen de acero dúctil de alta resistencia para trabajar con alta presión y velocidad, sin embargo las tuberías se exponen al daño causado por la fatiga autogena, fatiga estructural, rasguños, grietas, corrosión y desprendimiento de material, existen diversas técnicas de medición exacta que se pueden utilizar para analizar las señales ultrasónicas obtenidas de ensayos no destructivos (END); una de las técnicas más utilizadas para análisis e interpretación de señales es la transformada continua de Wavelet (Continuos Wavelet Transform), pues con ella es posible filtrar y acondicionar señales ultrasónicas obtenidas de ensayos no destructivos de manera práctica desde una PC, al combinar varias de estas técnicas es posible obtener información importante de la señal.

Palabras Clave: técnicas de medición exacta, transformada Wavelet, transformada de Hilbert.

1. Introducción

Hoy existen diferentes técnicas de medición exacta que se pueden utilizar en los END para la inspección de tubería, con ellas podemos obtener mayor información y aprovechamiento de la señal ultrasónica obtenida, en este trabajo se muestra la descripción y aplicación de algunas de ellas. Con cerca de 54,000 kilómetros de tuberías en México, la inspección apropiada para mantener la buena condición de éstas es crítica. Es necesario tener un proceso de inspección automática de tubería que incluya varias fases, la medición del grosor de pared para detectar grietas, la evaluación de los defectos de fabricación de la tubería y la evaluación de la pérdida

del material por el flujo. El ambiente complicado, la distancia entre la punta del transductor y la pared de la tubería bajo detección, reduce la exactitud de la medida del espesor de la tubería, si el intervalo del tiempo entre el pulso transmitido y la señal del eco de la pared de la tubería se sabe, el espesor de la tubería se puede calcular fácilmente; sin embargo, en el ambiente complejo verdadero de la detección y la distancia del transductor a la pared es distinta para cada detección.

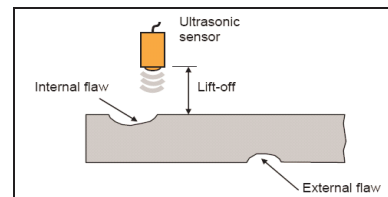


Fig. 1. Variación en la distancia del transductor a la pared.

Hay muchas razones complejas de la variación en la distancia del transductor a la pared (lift-off). Por ejemplo, los defectos geométricos, las vueltas de la tubería, y la cera o el mocho que adhiere a la pared de la tubería puede reducir la amplitud del eco ultrasónico y aumentar el ruido de la señal. Estos factores influyen grandemente la exactitud de la detección [1]

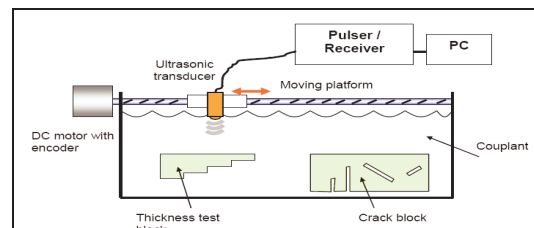


Fig. 2. Ejemplo ilustrativo de una medición ultrasónica.

2. Metodología

Existen diferentes técnicas de medición exacta las cuales se utilizan para el análisis de señales ultrasónicas obtenidas de END, en este caso se utilizaron las más apropiadas y las que aplicaban para cubrir las necesidades del análisis, únicamente aplicaron 3 técnicas:

- 1) Correlación Cruzada
- 2) Envolvente de Hilbert
- 3) Transformada continua de Wavelet

A continuación se describen dichos métodos exactos.

2.1 Correlación Cruzada

La CCF (Cross Correlation Function) Consiste en hacer una comparación entre 2 pulsos del tren de pulsos ultrasónicos tomando como referencia el pico máximo de la unión de los dos pulsos para obtener el tiempo estimado.

La CCF en el intervalo de 0 a T está definida de la siguiente manera [2]:

$$R_{XY}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{T} \right) \int_0^T X(t)Y(t+\tau) dt \quad (1)$$

Donde $X(t)$ and $Y(t)$ es una forma arbitraria de onda, t es el tiempo y τ es el retraso del intervalo. Si $Y(t)$ es reemplazado por $X(t)$ en la función de auto correlación esta puede ser escrita de la siguiente forma:

$$R_{XX}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{T} \right) \int_0^T X(t)X(t+\tau) dt \quad (2)$$

El tiempo de retardo es relacionado con la velocidad de propagación U y con el espesor de la muestra de la ecuación de la velocidad de penetración de las ondas ultrasónicas en los materiales

$$U = \frac{2d}{\tau} \quad (3)$$

Y la función queda de la siguiente forma:

$$R_{XX}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{T} \right) \int_0^T X(\tau)Y(\tau + \tau - 2d/U) dt \quad (4)$$

Esto es equivalente a la función de auto correlación $R_{XX}(\tau)$ Donde $\tau_1 = \tau - 2d/U$ por consiguiente, el pico central $\tau = 0$ es cambiando a $\tau_1 = 0$ o $\tau = 2d/U$.

La cantidad relativa de $R_{XY}(\tau)$ indica como las dos señales son correlacionadas por el valor particular del retraso. Si la CCF tiene picos con valores particulares de τ esto indica q la correlación es muy buena, recíprocamente, un valor pequeño indica poca o ninguna correlación. La técnica de correlación cruzada puede ser usada en la medición de velocidades ultrasónicas donde el tiempo de retraso entre dos ecos de pared puede ser computado con precisión, en la figura 3 se muestra un ejemplo real de la aplicación de esta técnica. La exactitud en la medición del tiempo de retardo puede ser reforzada con la aplicación de técnicas de interpolación con trazadores cúbicos del pico de una porción de la CCF.

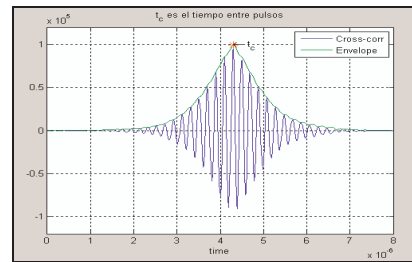


Fig. 3. Grafica de correlación cruzada, el tiempo graficado entre pulsos es de 4.3µs.

2.2 Envolvente de Hilbert

Consiste en obtener el pico máximo estimado de cada pulso por medio de la envolvente de Hilbert el cual está contenido en un tren de pulsos de la señal original, este se visualiza en una grafica de tiempo-amplitud la cual nos muestra los diferentes intervalos de tiempo. Para una serie de tiempo arbitrario $x(n)$ siempre podemos obtener la transformada de Hilbert de la siguiente manera [3]:

$$H(x(n)) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(u)}{\pi(t-u)} du \quad (5)$$

Donde la transformada de Hilbert de la señal reconstruida $y(n)$ está dada por

$$Y_R(u) = -Ae^{-\alpha n/f_s} \text{sen}\left(\frac{\omega n}{f_s}\right) \quad (6)$$

La señal analítica puede ser representada de la siguiente manera:

$$Y_A(n) = y(n) + iy_R(n) = Ae^{-\alpha n/f_s} \left[\cos\left(\frac{\omega n}{f_s}\right) - \text{sen}\left(\frac{\omega n}{f_s}\right) \right] \quad (7)$$

Tomando el modulo de la señal analítica:

$$Y_A(n) = Ae^{-\alpha n/f_s} \quad (8)$$

A través de la transformada de Hilbert, la envolvente de la señal analítica es obtenida y es parecida a la función Gaussiana. El pico de tiempo máximo indica el tiempo de llegada de la señal. Para dos ecos ultrasónicos con amplitudes diferentes y factor de caída aparecerán dos picos. Por consiguiente se pueden identificar el tiempo de llegada de los ecos sobrepuestos por sus tiempos máximos en las figuras 4 y 5 se muestra la aplicación de esta técnica a toda la muestra y al primer pulso obtenido.

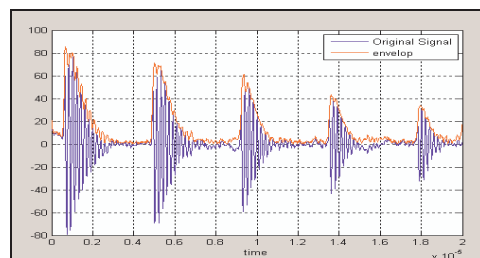


Fig. 4. Envolvente de Hilbert aplicada a la señal original.

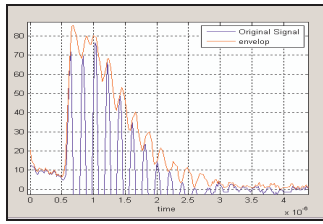


Fig. 5. Envoltura de Hilbert aplicada al primer pulso de la señal original.

2.3 Transformada de Wavelet

La transformada Wavelet es un método de convertir una función, que representa a una señal, en otra forma, cuyas características permite que su estudio sea más sencillo [4]. Wavelet permite el uso de intervalos de tiempo largo, donde podemos requerir de mayor precisión en la información de baja frecuencia y regiones más cortas en las de alta frecuencia. Su esquema se observa en la fig.6



Fig.6. Esquema de la Transformada Wavelet

Para realizarlo se requiere de una Wavelet, la cuál es una forma de onda. De hecho una Wavelet es una función $\psi(t)$, que satisface ciertos criterios matemáticos. Estas funciones son manipuladas a través de un proceso de traslación y dilatación para transformar la señal en otra, que cambia sus parámetros a tiempo y escala. Se puede utilizar cualquier Wavelet para analizar datos, pero la mejor será aquella que por la naturaleza de los datos se adapte para el análisis.

2.3.1 Filtro FIR basado en la aproximación de la wavelet Meyer: dmey

Esta wavelet es un filtro FIR basado en la aproximación de la wavelet Meyer, en la figura 7 se muestra su grafica, el cálculo se puede realizar rápidamente usando la DWT [4].

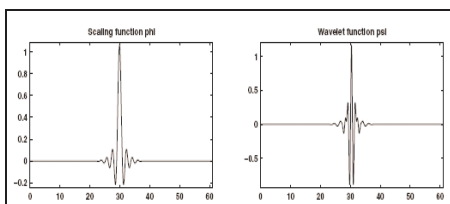


Fig. 7. Filtro FIR basado en la aproximación de la wavelet Meyer.

2.4 SNR

Es muy importante señalar que el ruido se mide con la SNR (Signal to Noise Ratio) o Relación Señal a Ruido que es la relación entre la potencia de la señal y la potencia del ruido. Esta relación generalmente se expresa en decibeles (dB) para facilitar el manejo de la información. La expresión matemática que define la SNR es[5]:

$$SNR(dB) = 10 \log \frac{P_s}{P_n} \quad (9)$$

Donde P_s es la potencia de la señal y P_n es la potencia del ruido.

2.5 Aproximaciones y Detalles

En el análisis de wavelet, se utilizan aproximaciones y detalles. La aproximación son las escalas altas, componentes de baja frecuencia de la señal. Y los detalles son las escalas bajas, y componentes de alta frecuencia. Para muchas señales, el contenido de bajas frecuencias (“aproximación”, de gran escala) es el más importante. Es el que le da a la señal su identidad. Las altas frecuencias (los “detalles”, de pequeña escala) también son importantes. Al usar el filtrado, nos separa nuestra señal en dos partes A y D, esto lo podemos ver en la figura 8.

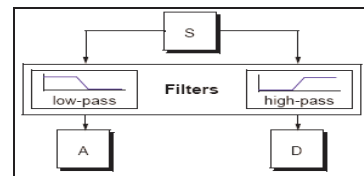


Fig.8. Wavelets rbio de orden 1.5

2.5 Limpieza de señales

Denosing

Una de las aplicaciones de mayor interés de la transformada wavelet es la supresión de las componentes ruidosas que contaminan a la señal en estudio. El principio de esta metodología de limpieza de señales se fundamenta en el hecho de que las componentes de alta frecuencia de la señal (detalles y ruido) se encuentran concentrados en los coeficientes de detalles de la descomposición wavelet. Por tal motivo, si estos coeficientes se ponderan, por ejemplo se hacen cero si son menores que un cierto valor umbral de lo contrario mantienen su valor. En el proceso de reconstrucción, la señal reconstruida es una versión limpia de la señal contaminada. La escogencia del valor umbral apropiado para cada aplicación sigue siendo motivo de interés, pues un valor umbral muy elevado elimina los detalles de interés para la señal en estudio, mientras que un

umbral muy bajo deja pasar componentes ruidosas. En esta aplicación en particular se recurrió a métodos empíricos a fin de definir el valor umbral más apropiado [6].

Proceso de descomposición de nivel-múltiple
 La descomposición es un proceso en el que se puede descomponer aproximaciones, de modo que una señal se divide en varios componentes de baja resolución. De hecho una wavelet tiene las características de un filtro pasa banda y la transformada de wavelet tiene las propiedades de ser un banco de filtros continuos con un voltaje constante, los filtros de ruido de wavelet son construidos calculando la transformada de la señal y aplicando un algoritmo que haga el cálculo de los coeficientes de forma automática [7]. Ver Figura 9.

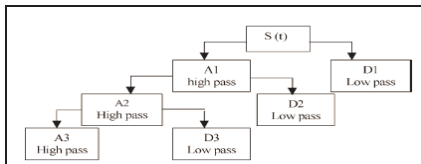


Fig. 9. Proceso de descomposición múltiple.

3. Análisis de resultados

En esta sección se muestran las diferentes graficas obtenidas por los diferentes tipos de wavelets y se muestra una grafica con el mejor resultado obtenido de este estudio comparativo
 Se trabajó con las señales ultrasónicas en una frecuencia de muestreo de 5 MHz y estas se obtuvieron de una placa de acero de las siguientes características:

- Block de calibración de Acero 1020
- Medidas :
- Largo: 2.4in
- Ancho: 2.3in
- Espesor: 0.5in
- Equipo de medición:
- Tarjeta de adquisición USB-UT350 marca ULTRATEK
- Transductor ultrasónico: L5KB marca GE

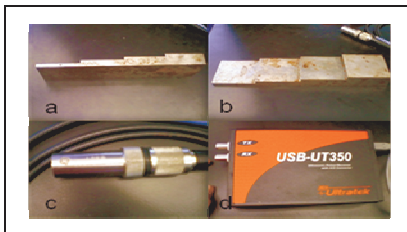


Fig. 10 a) y b) Placa de acero, c) transductor ultrasónico y d) tarjeta de adquisición de datos.

Una vez que se le adicionó el ruido a la señal original se analizó desde el toolbox de MATLAB utilizando la función Wavelet Toolbox Main Menu, donde se trabajo con el menú One dimensional usando la función Wavelet 1-D y así poder obtener las diferentes graficas de las familias de wavelets de la señal con ruido aleatorio. En la figura 11 se muestra el Wavelet Toolbox Main Menu desde donde se inicia la selección de la función con la que se desea trabajar.

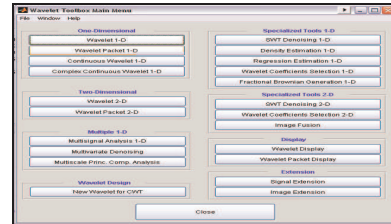


Fig.11. Aplicación de la Wavelet 1-D en una señal ultrasónica.

Por consiguiente se selecciona la función, en nuestro caso fue la Wavelet 1-D, después se selecciona la familia de wavelet que sea funcional para realizar el análisis y el manejo de la señal obtenida, esta operación se repite varias veces, con las diferentes familias de wavelets, haciendo varias combinaciones de nivel de aproximación y detalle en el programa hasta que se obtiene un resultado satisfactorio. En la figura 12 se muestra la aproximación y el detalle aplicando la Wavelet 1-D en un tren de pulsos ultrasónicos.

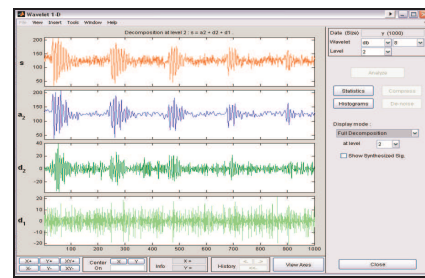


Fig. 12. Wavelet 1-D.

Finalmente que ya se tiene un resultado satisfactorio, se selecciona la familia de wavelet más adecuada y se procede a realizar la operación De-noise, dentro del menú Wavelet 1-D, se selecciona el método thresholding para el detalle de los coeficientes originales, con el cual se ajusta la amplitud de datos a tomar en la señal a tratar, una vez que ha sido ajustado, se aplica la función De-noise para así finalmente obtener la señal tratada por la familia de wavelet seleccionada, en este caso fue utilizado el método de Soft-thresholding con el cual se cubre toda la amplitud de la señal ultrasónica para no perder información alguna, en la figura 13 se muestra la

aplicación de la función De-noising en una señal ultrasónica con ruido. La señal tratada que obtenemos de este toolbox se considera como una señal filtrada y lista para trabajar y comparar con la señal original mediante diferentes técnicas de medición exacta.

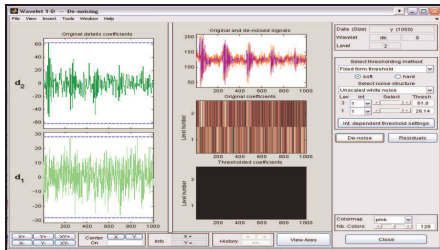


Fig. 13 Wavelet 1-D-De-noising

A continuación se muestran las gráficas obtenidas de todo el análisis con diferentes técnicas de medición exacta y con los diferentes programas creados por el autor y ejecutados en MATLAB. La figura 14 es la grafica obtenida de la señal original sin ruido, esta señal es obtuvo directamente de la placa de acero.

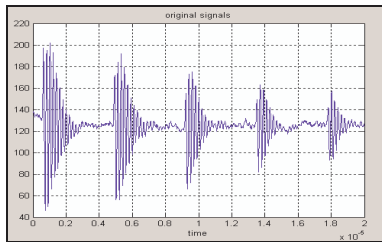


Fig. 14 Grafica de pulsos ultrasónicos originales visualizados desde MATLAB.

La figura 15 muestra 2 graficas de la señal original tratada con 2 técnicas de medición exacta, a) Correlación cruzada y b) Envolvente de Hilbert ambas técnicas graficaron un tiempo de $4.3\mu s$ entre los 5 pulsos generados por la placa de acero.

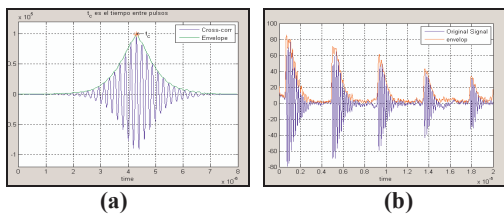


Fig. 15. Graficas originales (a) Correlación cruzada y (b) Envolvente de Hilbert, ambas sin ruido, el tiempo graficado entre pulsos es de $4.3\mu s$.

En la figura 16 se muestran las graficas de la señal original contaminada con ruido usando la función random de valor de 10, 15 y 20 sin tratar con alguna wavelet.

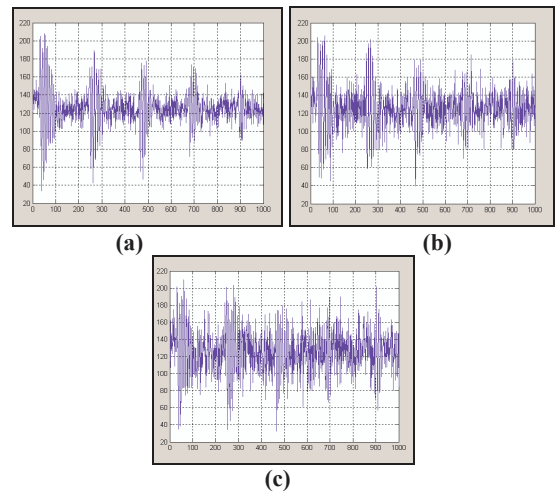
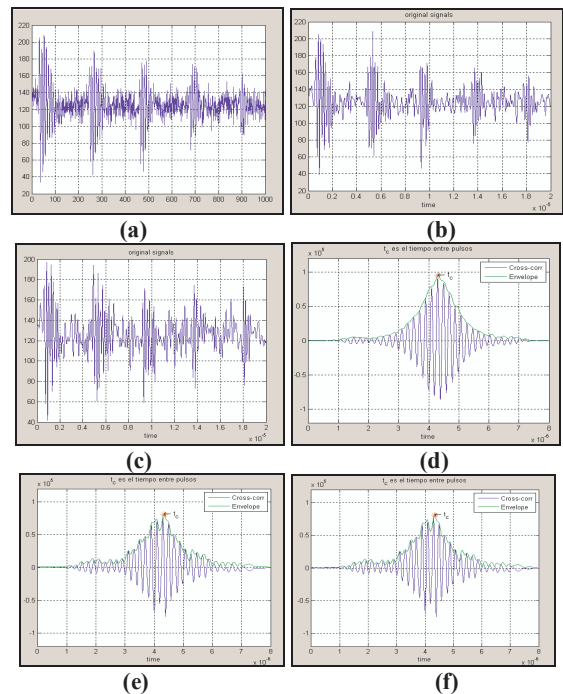


Fig.16. Señal original contaminada usando la función random con valores de a) 10,b) 15,c) 20.

La Señal tratada con aproximación de la wavelet Meyer son las tres primeras graficas de la figura 17 con el random de 10,15y 20, representadas por las (a), (b)y (c),las graficas siguientes fueron obtenidas con correlación cruzada las cuales se ven en (d), (e) y(f)las graficas (g),(h,(i) fueron obtenidas con la envolvente de Hilbert.



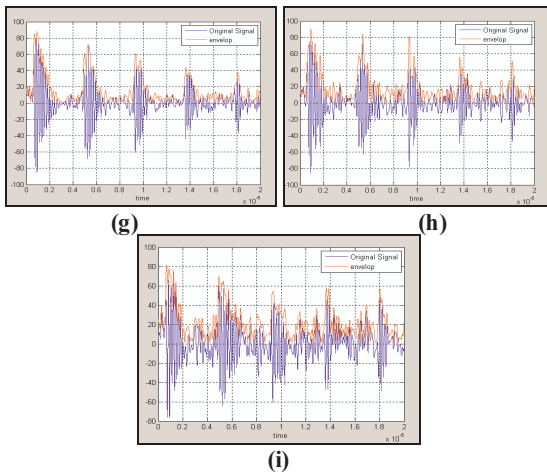


Fig.17. Señal tratada con Filtro FIR basado en la aproximación de la wavelet Meyer: dmey

La grafica 18 muestra tiempo, el nivel de ruido y el error aproximado entre los pulsos del tren de pulsos ultrasónicos de la Señal tratada con Filtro FIR basado en la aproximación de la wavelet Meyer, con la cual se obtuvo el mejor resultado.

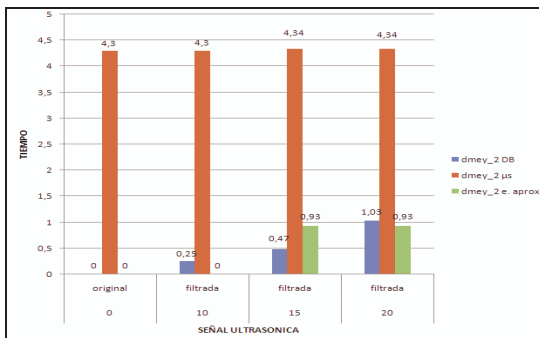


Fig.18. grafica de la señal tratada con Filtro FIR basado en la aproximación de la wavelet Meyer: dmey

4. conclusiones

Para el análisis anteriormente descrito se investigaron y desarrollaron diferentes técnicas de medición exacta, pero por la naturaleza de la señal obtenida solo se trabajó con tres de ellas; al utilizar diferentes familias de wavelets únicamente con una de ellas se obtuvieron buenos resultados que fue el Filtro FIR basado en la aproximación de la wavelet Meyer con el cual se realizó el filtrado de la señal en los 3 niveles de ruido donde en el primer nivel de ruido usando fue el random 10, la señal obtenida fue excelente y para los niveles 15 y 20 de random se obtuvo un error menor al 1% lo cual es satisfactorio; con las otras familias de wavelets al momento de realizar el filtrado y obtener el tiempo con la correlación cruzada y la envolvente de Hilbert, el

tiempo de vuelo estuvo oscilando en decimas y centésimas de microsegundos, el resultado fue bueno, pues por lo menos uno de los 3 tiempos obtenidos se encuentran dentro de los rangos obtenidos en la señal original y esto se comprueba con la magnitud del error aproximado, el cual en estos casos no llegó al 1%. Con esto se llegó a la conclusión que es necesario experimentar y probar con las diferentes técnicas de filtrado de señales y de medición exacta además de hacer varias comparaciones de tiempo de vuelo y así trabajar únicamente con las que apliquen para el análisis en particular pues estas técnicas también se pueden aplicar para obtener amplitud y frecuencia dependiendo del tipo de señal que se esté analizando.

Referencias

- [1]. Rubio C, "Calibration of ultrasonic transducers for a pipeline inspection device" (2007).
- [2]. Raj B., Rajendran V, Palanichamy P., "Science and Technology of Ultrasonics", Alpha Science International (2004).
- [3]. Tian-lu C, Pei-wen Q., Zhang Q., Liu Q., "Ultrasonic signal identification by empirical mode decomposition and Hilbert transform" (2005).
- [4]. Misti M., Misti Y., Oppenheim g., Poggi J., "Wavelet toolbox for use with matlab", version 2, The MathWorks, Inc.(2002).
- [5]. Hernández M., "Análisis Comparativo de Algoritmos para Reducción de Ruido en Señales Utilizando Wavelets" (tesis profesional), Universidad de las Américas Puebla, Escuela de Ingeniería Departamento de Ingeniería Electrónica(2003)
- [6]. Paredes J., Luzardo E. y Briceño H., "A Wavelet based method to characterize electrical insulators under partial discharges", Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia versión 28 numero 2 Maracaibo agosto 2005.
- [7]. Bettayeb F., Haciane S., Aoudia S., "Improving the time resolution and signal noise ratio of ultrasonic testing of welds by the wavelet packet", (2005).