

Desarrollo de un sistema portátil de procesamiento y visualización de señales ultrasónicas

Development of a portable system for processing and visualization of ultrasonic signals

CARMONA-MARTÍNEZ, Luis†*, SOTO-CAJIGA, Jorge, GÓMEZ-HERNÁNDEZ, Alejandro y RODRÍGUEZ-OLIVARES, Noé

Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI), Av. Playa Pie de la Cuesta No. 702, c.p. 76125, Col. Desarrollo San Pablo, Querétaro, Qro. México

Cuerpo Académico de Automatización y Control, Universidad Tecnológica de Querétaro (UTEQ), Av. Playa Pie de la Cuesta No. 2501, c.p. 76128, Col. Unidad Nacional, Querétaro, Qro. México

ID 1^{er} Autor: *Luis, Carmona-Martínez* / ORC ID: 0000-0002-7925-1229, Researcher ID Thomson: H-1068-2018, CVU CONACYT ID: 486128

ID 1^{er} Coautor: *Jorge, Soto-Cajiga* / ORC ID: 0000-0002-1737-5197, Researcher ID Thomson: I-5468-2018, CVU CONACYT ID: 167955

ID 2^{er} Coautor: *Alejandro, Gómez-Hernández* / ORC ID: 0000-0003-2089-9829, Researcher ID Thomson: H-1075-2018, CVU CONACYT ID: 486382

ID 3^{er} Coautor: *Noé, Rodríguez-Olivares* / ORC ID: 0000-0001-5892-0625, Researcher ID Thomson: I-5012-2018, CVU CONACYT ID: 444191

Recibido Junio 20, 2018; Aceptado Septiembre 30, 2018

Resumen

El presente trabajo consiste en el desarrollo tecnológico de un sistema portátil de procesamiento y visualización de señales ultrasónicas, que permite procesar las señales ultrasónicas capturadas de dos transductores piezoeléctricos en modo pulso eco o uno en modo dual. El objetivo del trabajo es contar con un equipo portátil de bajo costo y de arquitectura abierta para la inspección manual por ultrasonido. El desarrollo del sistema consiste en una serie de módulos electrónicos integrados a un FPGA, permitiendo el control y captura de señales ultrasónicas. Primero el FPGA envía la información capturada a una tarjeta de desarrollo Raspberry Pi 3 para el procesamiento de la señal. Después, se utiliza la Transformada Discreta de Fourier para ajustar la frecuencia de filtrado de la señal ultrasónica mediante un filtro FIR. Finalmente, la señal filtrada es visualizada en formato A-Scan mediante una pantalla compatible con la tarjeta Raspberry Pi 3 y esta información es utilizada para la medición de espesores y detección de fallas. La validación del sistema de medición se hizo utilizando un bloque escalonado para calibración de espesores y se compararon los resultados obtenidos contra un equipo comercial.

Ultrasonido, Transformada discreta de Fourier, procesamiento digital de señales

Abstract

The present work consists of the technological development of a portable system for the processing and visualization of ultrasonic signals, which allows to process the captured ultrasonic signals of two piezoelectric transducers in echo pulse mode or one in dual mode. The objective of the work is to have a portable equipment of low cost and open architecture for manual inspection by ultrasound. The development of the system consists of a series of electronic modules integrated to an FPGA, allowing the control and capture of ultrasonic signals. First the FPGA sends the captured information to a Raspberry Pi 3 development card for signal processing. Then, the Discrete Fourier Transform is used to adjust the filtering frequency of the ultrasonic signal through an FIR filter. Finally, the filtered signal is displayed in A-Scan format through a screen compatible with the Raspberry Pi 3 card and this information is used for thickness measurement and fault detection. The validation of the measurement system was made using a stepped block for thickness calibration and the results obtained against a commercial team were compared.

Ultrasound, discrete Fourier transform, digital signal processing

Citación: CARMONA-MARTÍNEZ, Luis, SOTO-CAJIGA, Jorge, GÓMEZ-HERNÁNDEZ, Alejandro y RODRÍGUEZ-OLIVARES, Noé. Desarrollo de un sistema portátil de procesamiento y visualización de señales ultrasónicas. Revista de Cómputo Aplicado. 2018, 2-7: 15-23.

* Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: alberto0488@hotmail.com)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

Introducción

El mantenimiento preventivo, es la actividad humana cuyo fin es asegurar la calidad del funcionamiento de bienes y servicios que proporcionan las máquinas e instalaciones (Pérez, 1977). Una de las preocupaciones más frecuentes en diferentes ramos de la industria es el problema de la corrosión, efecto que ataca a la mayoría de los metales y debilita su estructura, este fenómeno llega a poner en riesgo a los sistemas de producción, como en el caso de la industria civil y petrolera. Así mismo la corrosión y las imperfecciones en recipientes y ductos que transportan materiales peligrosos a alta presión, son un peligro para las personas que interactúan y se encuentran cerca de ellos.

México cuenta con normas y reglamentos que establecen las bases para que el transporte y almacenamiento de materiales peligrosos se desarrolle en un marco de seguridad y eficiencia para los trabajadores, usuarios, medio ambiente y las vías generales de comunicación, ejemplos de esto son: el Reglamento del servicio Ferroviario y el Reglamento para el transporte terrestre de Materiales y Residuos Peligrosos. La inspección de estos ductos y recipientes, respecto a las normas y reglamentos, debe ser realizada por un particular (tercero) certificado, encargado de validar el correcto estado de los ductos y recipientes.

La medición de espesores es una tarea indispensable en la supervisión y en el mantenimiento de una gran cantidad de sistemas de distribución de líquidos y gases, principalmente en aquellos con características corrosivas. La medición de espesores mediante el empleo de ondas ultrasónicas es un método alternativo que ha tenido un gran éxito en esta labor, dado que permite obtener medidas suficientemente precisas sin causar ningún daño a la estructura analizada.

En las pruebas realizadas para la medición de espesores por medio de ultrasonido, para visualizar la información deseada se requiere adquirir las señales por medio de un osciloscopio, Matlab y/o Labview, para luego ser interpretadas por medio de cálculos, este procedimiento es poco flexible debido a la cantidad de equipos que se requieren y al procedimiento realizado para interpretarlos.

Existen equipos de uso comercial, sin embargo estos equipos son costosos, con arquitectura cerrada y algunos pocos flexibles en el manejo de datos. Actualmente se desea aprovechar las investigaciones realizadas para desarrollar un equipo de medición de espesores por ultrasonido que sea de uso portátil, sin embargo para alcanzar dicho objetivo se requiere que el sistema cuente con una interfaz, que permita al usuario interactuar con el dispositivo de forma fácil y entendible. Dado que una interfaz comercial no puede acoplarse directamente al sistema portátil de procesamiento y visualización de señales ultrasónicas, es necesario desarrollar una arquitectura que procese la información y la muestre de forma gráfica y entendible.

La realización de este proyecto complementará las investigaciones realizadas, permitiendo crear un equipo portátil de medición de espesores, capaz de mostrar la información obtenida, de forma deseada para el usuario. Además, el desarrollo de esta arquitectura permitirá la creación de tecnología propia, encaminado a reducir costos en la implementación de aplicaciones que involucren medición de espesores, orientados al medio industrial regional y nacional.

En cuestión de trabajos desarrollados, relacionados con el desarrollo de interfaces gráficas para sistema portátil de procesamiento y visualización de señales ultrasónicas, se tienen los siguientes:

Guangde Song (Song, 2004) Publicó un artículo en el cual presentan un nuevo instrumento inteligente, especializado en la inspección de defectos en rieles, el sistema utiliza como interfaz gráfica una PC industrial en la cual visualizan las imágenes en formato A-Scan.

Olarte Cortes (Cortez, 2010), publicó una tesis la cual tuvo como objetivo el diseño e implementación de un dispositivo para medir espesores de tuberías y tanques mediante la utilización de señales de ultrasonido, este sistema diseñado para ser portátil, utilizando como interfaz un LCD de 16x2.

John Jiménez (Jimenez, 2010), publicó un artículo sobre la detección y caracterización de defectos en tuberías metálicas en pruebas ultrasónicas por inmersión, en esta investigación realizan ensayos no destructivos por medio de medición por ultrasonido, utilizando como interfaz gráfica para el análisis de las pruebas Labview.

Dingguo Xiao (Xiao, 2012), publicó un artículo el cual tuvo como objetivo, el desarrollo de un sistema para medir las características de los detectores de fallas ultrasónicas, la interfaz utilizada en este equipo es una computadora con un programa desarrollado en C++.

El valor agregado de este trabajo respecto a los trabajos encontrados consiste en la portabilidad del sistema y en la visualización gráfica en formato A-Scan, que permite al usuario dar una mejor interpretación de la señal capturada.

El artículo está estructurado de la siguiente manera: En la sección 2 se presenta una breve descripción del marco teórico que fundamenta esta investigación. El desarrollo de este trabajo se presenta en la sección 3 e incluye la descripción de la arquitectura del sistema y la interfaz gráfica. En la sección 4 se muestran los resultados obtenidos de las pruebas realizadas. Finalmente en la sección 5 se presentan las conclusiones del trabajo.

Marco teórico

Las ondas sonoras que están más allá del umbral máximo de audición de los humanos (desde los 16 Hz y tiene un límite superior de aproximadamente 20 KHz) se clasifican como ultrasonidos, que generalmente comienza en un límite inferior de aproximadamente 18 KHz (Ahmad, 2012).

A medida que aumenta la frecuencia del ultrasonido, la longitud de onda disminuye permitiendo un mayor grado de precisión y resolución de medición que sería necesario para aplicaciones tales como la ecografía médica, que utiliza frecuencias de ultrasonido entre 2 y 20 MHz. Cuando una señal de ultrasonido viaja de un medio material a otro medio diferente, un porcentaje de la energía de señal pasa al otro medio, mientras que el resto de la energía se refleja hacia atrás (Figura 1).

Dada la velocidad de las señales de ultrasonido en varias densidades de material y midiendo las propiedades de la señal reflejada, como la diferencia temporal entre ecos y la magnitud de la señal, podemos calcular cierta información útil sobre el material examinado, como el espesor, permitiendo así, hacer un análisis no destructivo de los materiales (Ahmad, 2012).



Figura 1 Principio de operación del ultrasonido
 Fuente: (Olympus Corporation, 2011)

El método matemático para el análisis por ultrasonido está determinado por la Ecuación 1. Donde d representa el espesor del material, v representa la velocidad del sonido en el material y t el tiempo de vuelo (Olympus Corp., 2011).

$$d = \frac{1}{2} v * t \quad (1)$$

Formatos de presentación

La presentación de las señales depende del equipo ultrasónico utilizado. Entendiéndose por presentación de señales la forma como las señales recibidas son procesadas y mostradas en la pantalla para tener un medio de evaluación. Existen tres tipos de presentación estandarizadas: A-Scan, B-Scan y C-Scan (Sagrero, 2012), también pueden presentarse otros tipos de presentación de señales dependiendo del número y estilo de transductores.

Muchos de los sistemas ultrasónicos de prueba utilizan una presentación básica A-Scan (Figura 2). La línea base horizontal indica el tiempo transcurrido o distancia recorrida por el haz ultrasónico (de izquierda a derecha) y la deflexión vertical muestra la amplitud de la señal (ECO).

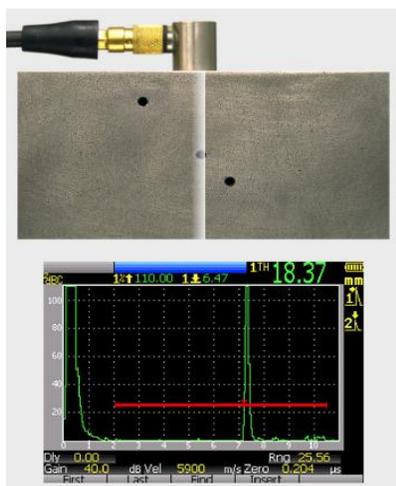


Figura 2 Presentación A-Scan
 Fuente: (Olympus Corporation, 2018)

Cuando se conocen las dimensiones del objeto de prueba, el ultrasonido puede utilizarse para medir las velocidades ultrasónicas y calcular el módulo elástico de un material. La amplitud de la señal representa la intensidad de la energía ultrasónica recibida por el equipo. Esto puede relacionarse con el tamaño de discontinuidades, atenuación en el objeto de prueba, dispersión del haz y otros factores. Frecuentemente la visualización B-Scan (Figura 3) se usa conjuntamente con la visualización A-Scan como una adición a la visualización A-Scan estándar. Por lo tanto el criterio de diseño del sistema depende del equipo A-Scan y de la aplicación requerida. Cuando se necesita una alta velocidad de exploración la visualización B-Scan puede ser una ventaja para el operador. La vista B-Scan muestra una vista bidimensional de la sección transversal de la pieza bajo ensayo. Usualmente, el eje horizontal representa la posición del transductor y el eje vertical representa el recorrido del haz ultrasónico (espeso de la pieza).

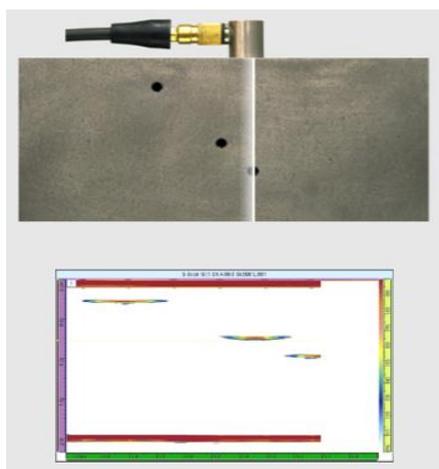


Figura 3 Presentación B-Scan
 Fuente: (Olympus Corporation, 2018)

La presentación C-Scan (Figura 4) es una visualización bidimensional de los datos ultrasónicos mostrados como vista superior de la pieza bajo ensayo. En la visualización C-Scan tanto el eje Vertical como el eje horizontal, representando las coordenadas del transductor.

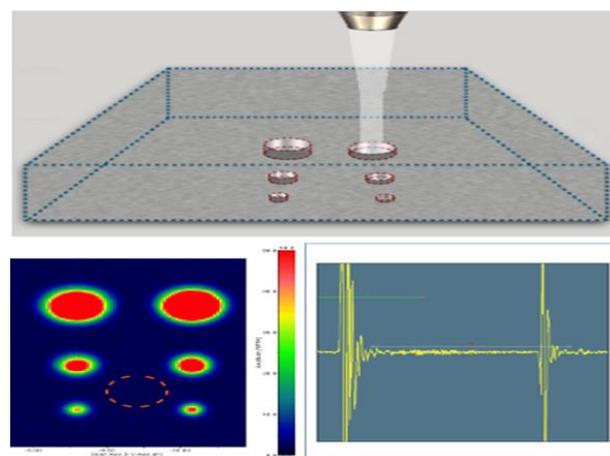


Figura 4 Presentación C-Scan
 Fuente: (Olympus Corporation, 2018)

Transformada discreta de Fourier

Las transformaciones matemáticas son aplicadas a las señales para obtener de ellas más información que aquella que se puede obtener de la señal pura. La idea de Fourier de representar una señal periódica como una suma ponderada de senos y cosenos fue recibida con escepticismo en 1807, hoy en día es la más conocida de las transformaciones existentes, permitiendo transformar el punto de vista de una señal desde la base de tiempo a la base de frecuencia, tal como se presenta en la Figura 5.

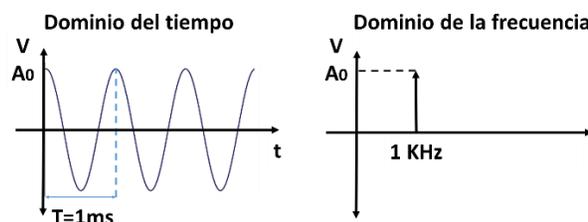


Figura 5 Representación gráfica de Fourier
 Fuente: Elaboración Propia

La función original es una función en el dominio del tiempo, pero al momento de realizar operaciones se debe tratar con señales continuas o series de datos de longitud infinita. La electrónica obliga a trabajar con un número finito de datos discretos que además tienen una precisión finita.

Es donde entra la transformada discreta de Fourier, la cual solo requiere que la función de entrada sea una secuencia discreta y con duración finita. Dicha secuencia se suele generar a partir del muestreo de una función continua como se muestra en la Tabla 1.

Tipo de transformada	Ejemplo de señal
Transformada de Fourier	
Transformada discreta de Fourier	

Tabla 1 Comparación de transformadas
Fuente: *Elaboración Propia*

La transformada discreta de Fourier en el dominio del tiempo, $x[n]$ consiste en una serie de puntos que corren de 0 a $N - 1$. En el dominio de la frecuencia la transformada discreta de Fourier produce dos señales que corren de 0 a $N/2$, una parte real, escrita como: $ReX[n]$, y una parte imaginaria, escrita como: $ImX[n]$. La transformada discreta de Fourier va del dominio del tiempo a la frecuencia, mientras que la transformada discreta inversa de Fourier va del dominio de la frecuencia al dominio del tiempo, como se muestra en la Figura 6.

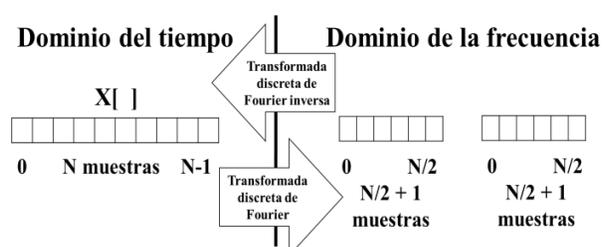


Figura 6 Representación del dominio del tiempo al de la frecuencia y viceversa
Fuente: *Elaboración Propia*

Desarrollo

La arquitectura desarrollada en este trabajo está compuesta por un sistema de transductores piezoeléctricos ultrasónicos, un sistema de generación de pulsos, un sistema receptor de señales de ultrasonido, un sistema de adquisición de las señales, un sistema de procesamiento y un sistema de visualización de las señales ultrasónicas (Figura 7).

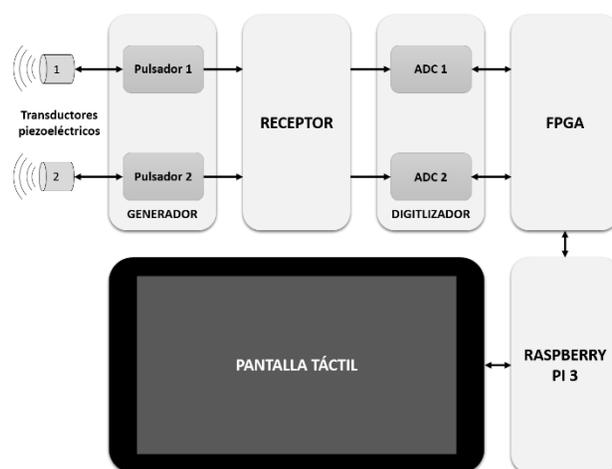


Figura 7 Arquitectura del sistema portátil de procesamiento y visualización de señales ultrasónicas
Fuente: *Elaboración Propia*

Sistema de generación, recepción y digitalización de señales ultrasónicas

En el sistema portátil de procesamiento y visualización de señales ultrasónicas de este trabajo, como en muchos otros sistemas electrónicos sofisticados, los componentes de procesamiento de señales analógicas son clave para determinar el rendimiento general del sistema.

El primer sistema que entra en función de todos es el generador de pulsos de alto voltaje (-100 VDC) con duración de tiempos cortos (ns), el objetivo de este sistema es generar los pulsos para que el transductor piezoeléctrico pueda convertirlos en pulsos sonoros de alta frecuencia, al rebotar y ser regresados al transductor, este mismo los convierte en señales eléctricas para ser enviadas a un convertidor analógico-digital (sistema digitalizador) y poder llegar en forma binaria al FPG.

Otra parte clave de la arquitectura de este trabajo es el sistema receptor compuesto por un circuito acondicionar de señales analógicas, el cual se encarga de suprimir el alto voltaje, recibir solo las señales ultrasónicas, mitigar ruidos no deseados y amplificar las señales ultrasónicas para su posterior digitalización. Finalmente el sistema digitalizador se encarga de capturar las señales provenientes del transductor piezoeléctrico de 5 MHz a una tasa 10 veces más (50 Mhz) para poder procesar mejor la señal.

Sistema de procesamiento y visualización

El sistema de procesamiento y visualización está compuesto principalmente por una tarjeta Raspberry Pi 3 y una pantalla táctil de 7 pulgadas. Las señales recibidas por el FPGA son enviadas a la Raspberry Pi 3 por medio de comunicación serial en paquetes de 1025 bytes que forman una señal completa. Cada señal es procesada antes de ser visualizada en formato A-scan, como se muestra en la Figura 8.



Figura 8 Secuencia de procesamiento mediante Fourier
Fuente: *Elaboración Propia*

El primer paso del procesamiento consiste en aplicar la transformada discreta de Fourier para convertir la señal del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia, la ecuación utilizada para aplicar la transformada discreta de Fourier es la que se muestra en la Ecuación 2 (parte real) y en la Ecuación 3 (parte imaginaria).

$$ReX[k] = \sum_{i=0}^{N-1} x[i] \cos\left(\frac{2\pi ki}{N}\right) \quad (2)$$

$$ImX[k] = \sum_{i=0}^{N-1} x[i] \sin\left(\frac{2\pi ki}{N}\right) \quad (3)$$

Una vez en el dominio de la frecuencia se aplica una máscara sobre el arreglo de datos para eliminar las frecuencias no deseadas y finalmente se aplica la transformada discreta de Fourier inversa (Ecuación 4) para convertir la señal filtrada del dominio de la frecuencia al dominio del tiempo, y así poder ser utilizada la señal para su visualización.

$$ReX[k] = \sum_{i=0}^{N-1} x[i] \cos\left(\frac{2\pi ki}{N}\right) + ImX[k] \sum_{i=0}^{N-1} x[i] \sin\left(\frac{2\pi ki}{N}\right) \quad (4)$$

Interfaz de usuario

La interacción general se lleva a cabo por medio de interfaces gráficas empleando una pantalla táctil para seleccionar los comandos (Figura 9). El software empleado para el desarrollo de este proyecto fue el sistema operativo Raspbian y el lenguaje de programación Python 2.7.



Figura 9 Panel principal de la interfaz gráfica
Fuente: *Elaboración Propia*

La interfaz está compuesta de elementos cuya jerarquía es descendente:

1. Librerías
2. Programa raíz
3. Ventana principal
4. Sub-ventanas

Las librerías definen en sí mismo ciertas funciones que facilitan al usuario el desarrollo de programas. Las librerías utilizadas fueron: Tkinter, para la aplicación de interfaces gráficas; ImageTk, para agregar un soporte extenso en los formatos de imágenes utilizadas para la decoración de la interfaz; Numpy, agrega la capacidad de manipular arreglos de datos y las operaciones aritméticas necesarias para el procesamiento de las señales; y Matplotlib, es una librería en 2D que da las herramientas necesarias para la visualización en formato A-Scan del vector de datos de la señal.

El programa raíz, es el elemento principal del programa. Aquí es donde se define el objeto de la ventana principal, los atributos de la ventana y la ejecución del ciclo hasta el cierre del programa.

La ventana principal (Figura 9), es la parte gráfica que le permite al usuario seleccionar entre cuatro posibles opciones como: abrir la sub-ventana A-Scan, para capturar y visualizar las señales en formato A-Scan (Figura 10); abrir la sub-ventana Configuraciones, para ajustar manualmente los parámetros de ancho de pulso de excitación para el transductor, voltaje del pulso de excitación para el transductor, la frecuencia de repetición del pulso, la ganancia de la adquisición, los puntos de corte del filtro, la cantidad de datos a adquirir para cada señal, la frecuencia de operación del transductor y la velocidad del sonido en el material; abrir la ventana Acerca, para mostrar la información acerca de la versión del programa, así como sus desarrolladores; y salir, para permitirle al usuario terminar la aplicación.

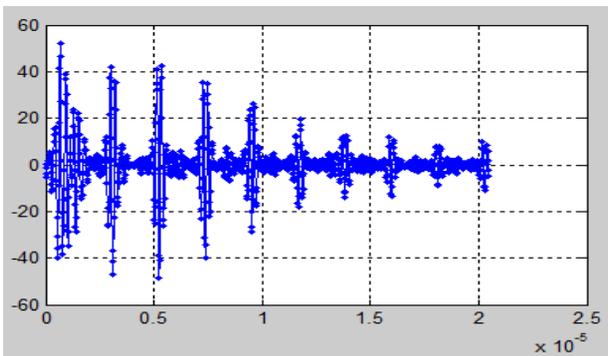


Figura 10 Señal visualizada en A-Scan
Fuente: Elaboración Propia

Resultados

La validación del sistema portátil de procesamiento y visualización de señales ultrasónicas, desarrollado en este trabajo, se realizó utilizando un bloque escalonado para calibración de espesores (Figura 11) que cuenta con cuatro niveles de espesor (6.35 mm, 12.7 mm, 19.05 mm y 25.4 mm) y se compararon los resultados obtenidos contra un equipo comercial de buena calidad.



Figura 11 Bloque escalonado de cuatro niveles
Fuente: Elaboración Propia

La prueba de medición de espesores tiene como objetivo verificar que el sistema tenga la capacidad de generar, recibir y digitalizar las señales de ultrasonido, para posteriormente conocer el tiempo de vuelo entre los ecos y saber el espesor que se está midiendo. En la Tabla 2 se presenta un resumen estadístico de 30 muestras de medición de cada nivel de la barra escalonada, adquiridas con el sistema portátil de procesamiento y visualización de señales ultrasónicas utilizando un transductor piezoeléctrico de 5 MHz en modo pulso eco.

Muestra	Espesor			
	Nivel 1 (6.35 mm)	Nivel 2 (12.7 mm)	Nivel 3 (19.05 mm)	Nivel 4 (25.4 mm)
Promedio	6.31	12.67	19.01	25.34
Val. máx.	6.48	12.72	19.14	25.39
Val. mín.	6.18	12.66	18.85	25.33
Moda	6.18	12.66	19.14	25.33
Desv. est.	0.12187	0.02232	0.12478	0.02232
	6	6	6	6

Tabla 2 Resumen estadístico muestras adquiridas con el sistema portátil de procesamiento y visualización
Fuente: Elaboración Propia

A continuación se procede a analizar un equipo comercial, el equipo comercial seleccionado es un Pulse-Receiver con convertidor analógico digital de un solo canal, de la marca Ultratek®, modelo USB-UT350 de bajo costo y eficiente para adquirir espesores. Para poder realizar una comparación entre los sistemas, se toman 30 muestras de cada nivel de espesor del bloque escalonado. En forma de resumen estadístico se presenta la información en la Tabla 3.

Muestra	Espesor			
	Nivel 1 (6.35 mm)	Nivel 2 (12.7 mm)	Nivel 3 (19.05 mm)	Nivel 4 (25.4 mm)
Promedio	6.32	12.66	18.97	25.31
Val. máx.	6.36	12.66	19.02	25.33
Val. mín.	6.30	12.60	18.91	25.21
Moda	6.30	12.66	18.97	25.33
Desv. est.	0.026492	0.014943	0.023712	0.029686

Tabla 3 Resumen estadístico muestras adquiridas con el equipo comercial
Fuente: Elaboración Propia

Las Figuras 12, 13, 14 y 15 son gráficas que muestran que las mediciones de espesores con el sistema portátil de procesamiento y visualización de señales ultrasónicas, están dentro de la normatividad que requiere una precisión de ± 0.2 mm en superficies planas y espesor de pared.

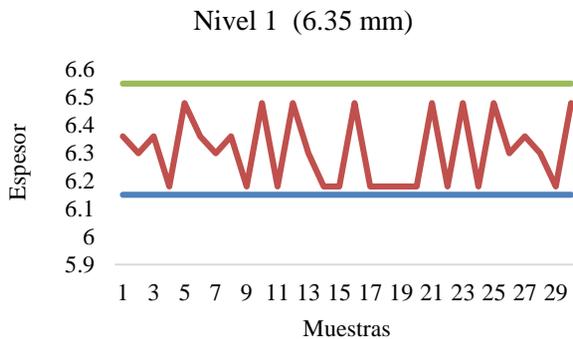


Figura 12 Gráfica de muestras del nivel 1 con rangos
Fuente: Elaboración Propia

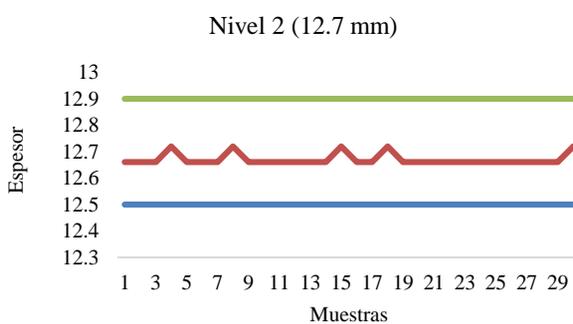


Figura 13 Gráfica de muestras del nivel 2 con rangos
Fuente: Elaboración Propia

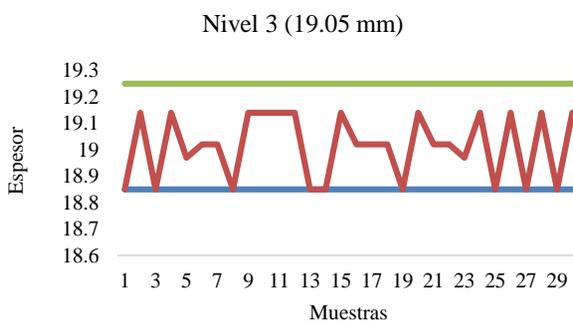


Figura 14 Gráfica de muestras del nivel 3 con rangos
Fuente: Elaboración Propia

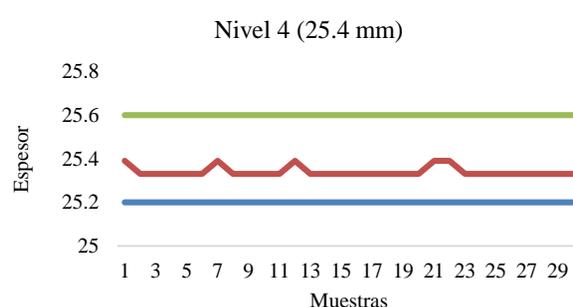


Figura 15 Gráfica de muestras del nivel 4 con rangos
Fuente: Elaboración Propia

Conclusiones

A partir de los resultados obtenidos de la investigación se concluye que el equipo portátil desarrollado en este trabajo para el análisis de espesores por ultrasonido es comparable con un equipo comercial, pero con la ventaja de un costo menor de aproximadamente 5 mil pesos, equivalente a una cuarta parte del precio de un equipo comercial. Este trabajo también tiene la capacidad de ser mejorado agregando a futuro otras formas de análisis como el B-Scan y C-Scan. También es importante mencionar la facilidad de actualizando a nivel de hardware de este trabajo, gracias a la capacidad del programa en Python que le permite ser trasladado a otro equipo con sistema operativo basado en Linux preferentemente, esperando el mismo funcionamiento con tan solo ajustar los parámetros de comunicación.

Agradecimientos

Proyecto apoyado por la dirección de Energía del Centro de ingeniería y Desarrollo Industrial, la beca CONACYT 591748 y por el Fondo sectorial de Investigación para el Desarrollo Aeroportuario y la Navegación Aérea clave 242864.

También se agradece al cuerpo académico de automatización y control de la universidad tecnológica de Querétaro por el apoyo brindado.

Referencias

E. K. Ahmad. (2012). *Ultrasonic Non-Destructive Testing (NDT) Using Wireless Sensor Networks*, Canada: ELSEVIER.

Jiménez Gómez, J., & Loaiza Correa, H. (2010). Detección y caracterización de defectos en tuberías metálicas en pruebas ultrasónicas por inmersión. *El Hombre y la Máquina*, 2010(34), 56-67.

Olarte Cortez, W., & Silva Ortega, C. A. (2010). *Diseño e implementación de un dispositivo para medir espesores de tubería y tanques metálicos mediante la utilización de señales de ultrasonido*. (Tesis inédita de maestría). Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira.

Olympus Corporation. (2011). *Ultrasonic Transducers Technical Notes*, Houston, TX, USA: OLYMPUS NDT.

CARMONA-MARTÍNEZ, Luis, SOTO-CAJIGA, Jorge, GÓMEZ-HERNÁNDEZ, Alejandro y RODRÍGUEZ-OLIVARES, Noé. Desarrollo de un sistema portátil de procesamiento y visualización de señales ultrasónicas. *Revista de Cómputo Aplicado*. 2018

Olympus Corporation. (Último acceso: Jun 2018). *Principios de base de la creación de imágenes*, <https://www.olympus-ims.com/es/ndt-tutorials/instrumentation/intro/>

Pérez, F. M. (1977). *Ciencia y técnica para el mantenimiento industrial*. México: LIMUSA.
Sagrero Rivera, J. (2012). *Ultrasonido Industrial Nivel I*. Queretaro.

Song, G., Zhan, X., & Zhang, H. (2004). An intelligent instrument for ultrasonic nondestructive examination flaw inspection of rails. *Fifth World Congress on Intelligent Control and Automation*, 4(04EX788), 3632-3635. doi: 10.1109/WCICA.2004.1343272

Xiao, D., Yang B., Pan, Q., Zhang K., & Deng M. (2012). Measurement of characteristic parameters of ultrasonic flaw detectors. *2012 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, 641-646. doi: 10.1109/ICMA.2012.6283217