

# PUESTA EN MARCHA DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN Y RECEPCIÓN DE ONDAS ULTRASÓNICAS PARA LA MEDICIÓN DE ESPESORES DE LÁMINA

Pérez Nieto, Luis Antonio (1), Balvantín García, Antonio de Jesús (2).

1 Licenciatura en Ingeniería Mecánica, Universidad de Guanajuato | Dirección de correo electrónico: la.pereznieto@ugto.mx

2 Departamento de Ingeniería Mecánica, División de Ingenierías, Campus Irapuato Salamanca, Universidad de Guanajuato | Dirección de correo electrónico: antonio.balvantin@ugto.mx

## Resumen

El crecimiento industrial de México se ha producido principalmente en la industria manufacturera. Recientemente, se destacan la industria automotriz y la aeroespacial, debido a la importancia económica que representan. Las materias primas de estas industrias son las láminas metálicas, principalmente de acero y aluminio. Los espesores reducidos de lámina y las estructuras confinadas que se producen con ellas, tales como contenedores cerrados, dificultan la identificación de defectos tipo reducción de espesor. Por lo anterior, se requiere un método preciso para el monitoreo del estado de los materiales a transformar. En este trabajo de investigación, se plantea la implementación del ultrasonido como una alternativa para la medición del espesor de láminas y placas, con la finalidad de cumplir con los estándares de calidad y seguridad que exige actualmente el mercado. Se propone también, la comparación entre dos métodos de inspección con ultrasonido: pulso-eco y transmisión continua. En base a los resultados obtenidos, fue posible determinar cuál de los dos métodos estudiados se puede implementar de mejor manera para cumplir el objetivo de medir espesores y así garantizar la uniformidad de las láminas para distintos procesos de manufactura.

## Abstract

The industrial growth of Mexico has occurred mainly in the manufacturing industry. Recently, the development of automotive and aerospace industries has been outstanding due to their economic importance. The raw materials of these industries are mainly steel and aluminum sheets metals. The reduced thickness of the sheet metals and the confined structures that can be generated with them, such as closed containers, make difficult the identification of thickness reduction defects. Therefore, an accurate method for the monitoring of the status of materials to transform is required. In this work, the implementation of ultrasound is proposed as an alternative for measuring the thickness of sheets and plates, in order to meet the quality and safety standards currently required by the market. A comparison between two ultrasound inspection methods, pulse-echo and continuous transmission, is also proposed. Based on the obtained data, it was possible to establish which one of the two studied methods can be better implemented to meet the objective of thickness measurement and thus, ensure the uniformity of materials for different manufacturing processes.

## Palabras Clave

Ondas Guiadas; Pulso-Eco; Transmisión Continua; Velocidad de Propagación.

## INTRODUCCIÓN

Actualmente, el conformado de láminas y placas de distintos materiales, como son: el acero, el aluminio, entre otros, es uno de los procesos de fabricación de mayor relevancia debido a su empleo en diferentes sectores industriales de alto impacto económico, como lo son el aeroespacial y el automotriz. Dichos sectores siempre buscan desarrollar y mejorar sus procesos, por lo cual, les resulta necesario recurrir a pruebas experimentales que permitan la caracterización de los materiales que emplean en sus procesos. Sin embargo, dichas pruebas a menudo implican un gasto significativo de recursos, tiempo y tradicionalmente, dichas pruebas implican la destrucción de las piezas a caracterizar [1]. Debido a lo anterior, existe una necesidad de implementar técnicas no destructivas para evaluar con precisión las propiedades de este tipo de materiales, para reducir costos de producción.

Uno de los métodos propuestos para realizar estas pruebas, es el uso de ultrasonido. Las ondas ultrasónicas guiadas, se han propuesto como un medio para la caracterización de defectos debido a su capacidad de propagarse en distancias relativamente largas y siguiendo la forma de las estructuras [2].

Para una estructura de tipo placa, uno de los principales parámetros a controlar es el espesor. Múltiples esfuerzos se han desarrollado para generar una técnica robusta y precisa para medir el tiempo de vuelo en una amplia variedad de materiales, con el objetivo de caracterizar y evaluar en condiciones de servicio el espesor de pared de estructuras completas sin necesidad de recurrir a su destrucción [3,4].

### Ondas ultrasónicas

El ultrasonido son ondas mecánicas, cuya frecuencia está por encima del umbral de audición del oído humano (aproximadamente 20 000 Hz). Una onda mecánica es una perturbación de las propiedades mecánicas de un medio material (posición, velocidad y energía de sus átomos o moléculas) que se propaga en el medio.

Todas las ondas mecánicas requieren una fuente que cree la perturbación y un medio de propagación. Por lo tanto, los puntos anteriores se cumplen de igual manera para el ultrasonido.

Las múltiples aplicaciones de las ondas ultrasónicas en ingeniería, así como sus características de propagación, son las principales razones para su estudio [5,6].

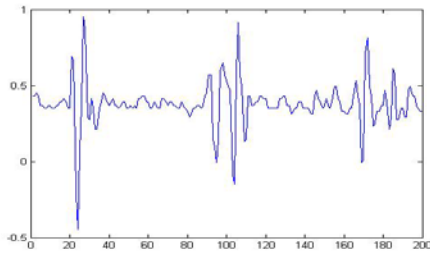
## MATERIALES Y MÉTODOS

Para el desarrollo del presente trabajo, se utilizarán 5 probetas de tres distintos materiales, siendo estos acero ASTM A36, aluminio 6061 y acrílico.

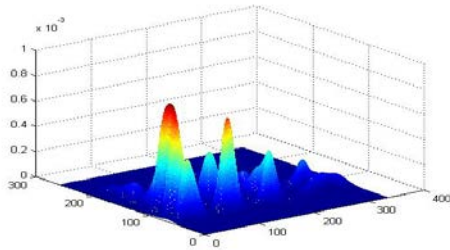
La caracterización del espesor, se realizará implementando ondas de ultrasonido, mismas que serán generadas con un pulsador-receptor Olympus 5077PR-15 U y transductores longitudinales de contacto con una frecuencia central de 1MHz. Posterior a ello, las ondas generadas por el pulsador-receptor, son procesadas y visualizadas con un osciloscopio Keysigth DSO1004A, de cuatro canales y 60 MHz. Finalmente, para la identificación de los parámetros de interés en las señales, se implementó la transformada de Fourier de tiempo corto (STFT), mediante una interfaz en LabView. En la Figura 1a, se puede observar una señal típica de ultrasonido en el dominio del tiempo, mientras que en la Figura 1b, se puede observar el pos-procesamiento de la señal implementando la STFT.

### Métodos de Inspección

Para desarrollar los experimentos, se hará uso de dos técnicas de inspección para medir el espesor de las probetas: pulso-eco y transmisión continua. Ambos métodos, se basan en la velocidad de propagación de las ondas de ultrasonido en cada material, cuyos valores se muestran en la Tabla 1.



a)



b)

Figura 1: a) Señal típica de ultrasonido; b) representación STFT.

Tabla 1: Velocidades de propagación del sonido en distintos materiales [7].

Material	Velocidad ( $mm/\mu s$ )
Acero	5,89
Acrílico	2,73
Aluminio	6,32

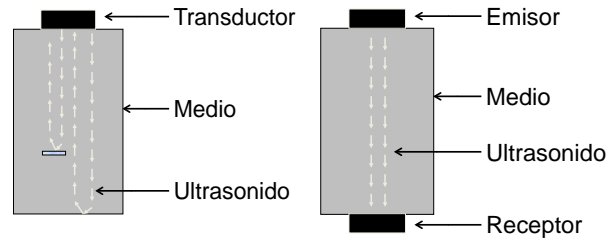
### Método de inspección Pulso-Eco

Involucra la detección de ecos producidos cuando un pulso ultrasónico es reflejado por una discontinuidad o una interface en una pieza. Cuando se requiere determinar el espesor, se multiplica el tiempo que tarda en reflejarse el eco entre pulsos, por la velocidad de propagación del sonido del material que conforma la pieza, dividiendo finalmente el producto anterior a la mitad, para así estimar el espesor de la pieza, ver Figura 2a.

### Método de inspección Transmisión Continua

Se base en detectar la intensidad del ultrasonido transmitido a través de una pieza, Figura 2b. Estas

pruebas requieren de dos unidades de búsqueda (transductores), una para transmitir las ondas y otra para recibirlas; además de requerir de un buen acoplamiento entre ambas unidades para minimizar las variaciones de sonido durante la transmisión. Cuando se requiere determinar el espesor, se multiplica el tiempo que tarda la señal en llegar del transductor emisor al receptor, por la velocidad de propagación del sonido del material que conforma la pieza, logrando estimar el espesor de la pieza de manera directa [8].



a)

b)

Figura 2: Métodos de Inspección: a) Técnica de pulso-eco; b) Transmisión continua.

### Descripción del sistema experimental

Para la realización de las pruebas experimentales, se implementó el banco de pruebas mostrado en la Figura 3, para capturar las señales producidas por cada probeta probada durante el desarrollo del proyecto. Dicho sistema está conformado por los equipos ya descritos, añadiendo una computadora, interconectados todos ellos entre sí.



Figura 3: Banco de pruebas experimental.

Para lograr una mejor precisión en la medición de espesores, se diseñaron probetas de distintas formas con varias dimensiones. La fabricación de dichas probetas se llevó a cabo en un centro de maquinado CNC KIWA. En la Figura 4, se muestran las probetas fabricadas.

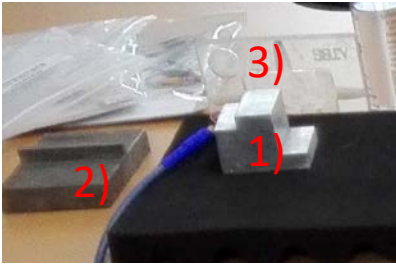


Figura 4: Ejemplos de probetas de calibración fabricadas: 1) Aluminio; 2) Acero; 3) Acrílico.

Posterior al proceso de fabricación de las probetas, se determinaron sus espesores en base a la metodología descrita anteriormente. Se determinaron las velocidades promedio de cada probeta, para de esta manera calibrar el banco de pruebas y así mejorar su precisión para mediciones en piezas distintas a las probetas utilizadas en este proyecto.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El objetivo del trabajo, es la determinación de espesores de distintos materiales de manera precisa y simple, con el propósito de reducir costos de pruebas y garantizar la seguridad en instalaciones en operación.

La Tabla 2 muestra los valores experimentales de velocidad calculados para cada material probado en el proyecto, con el fin de calibrar el equipo y además, corroborar con datos de literatura sobre velocidades de propagación de sonido y dar mayor certeza a este proyecto.

Tabla 2: Velocidades de propagación experimentales.

Material	Velocidad ( $mm/\mu s$ )
Acero	5,917152908
Acrílico	2,867576179
Aluminio	6,319277257

Posterior a la calibración del equipo, considerando las velocidades experimentales anteriores, se procedió a medir distintos espesores por medio del ultrasonido en base a las gráficas mostradas en las Figuras 5, 6 y 7, por los métodos de inspección de pulso-eco y transmisión continua. Los espesores medidos con vernier para las gráficas

mostradas fueron: 79,74 mm para el acero; 11,3 mm para el acrílico, y 51 mm para el aluminio.

En las pruebas experimentales con ultrasonido, se midieron espesores de aluminio de 10, 10.2, 12.7, 35, 44, 44.4 y 51 mm que corresponde a la medición con vernier reportada. En acero, se obtuvieron espesores de 19, 51.42, 109.75, 308, 309 y 79.75 mm, lo cual presenta una ligera discrepancia de 0.01 mm con respecto a la medición con vernier. Por último, en acrílico se determinaron espesores de 5.3, 7.3 y 11.3 mm, que también corresponde con la medición del vernier.

Como comprobación a los resultados de los espesores medidos por ultrasonido, tanto en la técnica de pulso-eco como en transmisión continua, se realizó un diseño de experimentos (DOE), con ayuda del software estadístico MINITAB, donde se analizó el comportamiento de dichas mediciones experimentales.

De los resultados del DOE se puede concluir que los valores obtenidos, siguen un comportamiento Gaussiano, y por tanto, podemos afirmar que las magnitudes de espesores obtenidas experimentalmente son correctas y repetibles, pero no necesariamente exactas. Para todas las muestras probadas, se tiene una varianza de 0.015, si se consideran los valores medidos con vernier como media. Sin embargo, del análisis realizado, es posible determinar que la variación de las mediciones es producto de la incertidumbre al momento de determinar los tiempos de vuelo de las ondas de ultrasonido, y no por inexactitudes en la técnica de inspección.

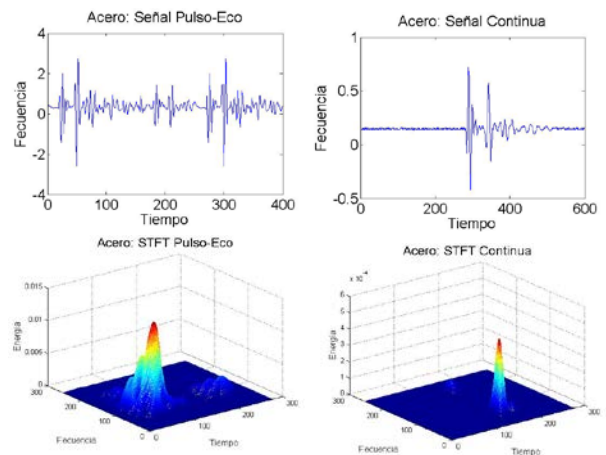


Figura 5: Caracterización del acero, espesor medido: 79,75 mm.



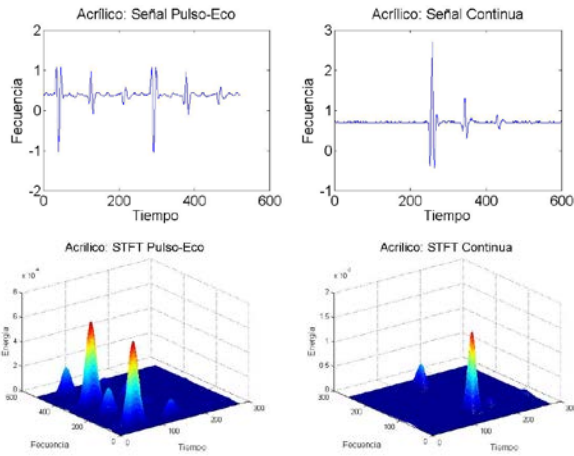


Figura 6: Caracterización Acrílico, espesor medido: 11,3 mm.

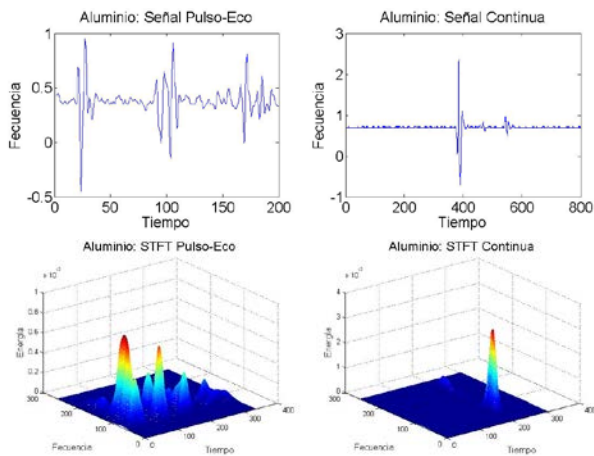


Figura 7: Caracterización Aluminio, espesor medido: 51 mm.

## CONCLUSIONES

Es factible concluir que se cumplió el objetivo del proyecto, debido a que se determinó el espesor de placas de distintos materiales de manera precisa implementando ondas ultrasónicas. Los resultados obtenidos son repetibles y tienen una variación del 1.5%. Adicionalmente, se determinaron las ventajas que presentan los métodos de inspección propuestos.

El método de pulso-eco, resulta más fácil de implementar, ya que solo requiere un solo transductor para las mediciones. Sin embargo, para espesores menores a 5 mm resulta complicado identificar los pulsos de las señales.

El método de transmisión continua, tiene la desventaja de requerir dos transductores alineados perfectamente para realizar las mediciones de espesor. Por otro lado, para espesores mayores a 300 mm, tiene la ventaja de una menor atenuación en la señal al viajar a través del material.

Como trabajo futuro, se propone el análisis de distintos tipos de señales ultrasónicas, como son las ondas Lamb, debido a su capacidad de propagarse grandes distancias y tener una mayor sensibilidad para detectar discontinuidades en los materiales [9].

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi asesor, el Dr. Antonio de Jesús Balvantín García y a todos los miembros del cuerpo académico de Ingeniería Mecánica de la DICIS, por su tiempo y apoyo para el desarrollo del proyecto. Así mismo, a la Universidad de Guanajuato por la oportunidad de participar en el Verano de la Investigación Científica 2016.

## REFERENCIAS

- [1] Meyers, M.A. & Chawla, K.K. (2009). Mechanical behavior of materials (2d ed.). Cambridge: Cambridge University Press (pp. 420-425).
- [2] Kundu, T., Maji, A., Ghosh, T., & Maslov, K. (1998). Detection of kissing bonds by Lamb waves. *Ultrasonics*, Vol. 35(8), pp. 573-580.
- [3] Egle, D. M., & Bray, D. E. (1976). Measurement of acoustoelastic and third-order elastic constants for rail steel. *The journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 60(3), pp. 741-744.
- [4] Kumon, R. E. (2002). Nonlinear SAW propagation in thin-film systems with residual stress. In *Ultrasonics Symposium*, 2002. *Proceedings. 2002 IEEE*, Vol. 1, pp. 419-422
- [5] Cheeke, J. D. N. (2012). *Fundamentals and applications of ultrasonic waves*. CRC press.
- [6] Biot, M. A. (1962). Mechanics of deformation and acoustic propagation in porous media. *Journal of applied physics*, Vol. 33(4), pp. 1482-1498.
- [7] Olympus Corp. (2016). Velocidades de propagación del sonido en el material. Recuperado de <http://www.olympus-ims.com/es/ndt-tutorials/thickness-gage/appendices-velocities/>
- [8] ASM Handbook. (1989). Volume 17: Nondestructive evaluation and quality control. ASM International, pp. 795.
- [9] Leonard, K. R., Malyarenko, E. V., & Hinders, M. K. (2002). Ultrasonic Lamb wave tomography. *Inverse problems*, Vol. 18(6), p. 1795.