

# Metodología experimental para la generación, procesamiento e interpretación de señales ultrasónicas en materiales compuestos

Experimental methodology for the generation, processing  
and interpretation of ultrasonic signals in composite materials

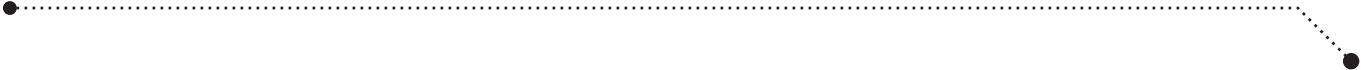
Saúl Hernández-Moreno <sup>a</sup>  
Antonio Balvanín-García <sup>b</sup>  
Víctor Ramírez-Elías <sup>c</sup>

Universidad de Guanajuato, División de Ingenierías,  
Campus Irapuato-Salamanca (DICIS), Diseño  
Mecánico y Manufactura, Evaluación no  
Destructiva y Materiales Compuestos, México.

<sup>a</sup> sa.hernandezmoreno@ugto.mx

<sup>b</sup> antonio.balvantin@ugto.mx

<sup>c</sup> va.ramirez@ugto.mx



**RESUMEN** — Los materiales compuestos tienen un amplio campo de aplicaciones en distintos tipos de industria como la automotriz, aeronáutica, aeroespacial, de transporte y militar. La evaluación no destructiva, utilizando ultrasonido, desempeña un papel importante en la prevención de fallas catastróficas en componentes y estructuras de ingeniería durante la totalidad de su vida operativa. En este trabajo se presenta el desarrollo de una metodología experimental para la generación, captura, procesamiento e interpretación de señales ultrasónicas en materiales compuestos mediante la implementación de una interfaz de adquisición, procesamiento y almacenamiento de señales utilizando el software comercial LabVIEW®. El uso del instrumento virtual desarrollado permite el monitoreo y captura de señales implementando diferentes filtros durante la inspección. Finalmente se muestra un análisis de las señales capturadas utilizando la transformada rápida de Fourier, FFT por sus siglas en inglés, para determinar los componentes de frecuencia de la señal, implementando una función desarrollada en MATLAB®.

**Palabras clave**— Materiales compuestos, Evaluación no destructiva, Manufactura, Componentes estructurales.

**Abstract**— Composite materials have a wide field of applications in different types of industries such as automotive, aeronautics, aerospace, transportation and military. Non-destructive evaluation, using ultrasound, plays an important role in the prevention of catastrophic failures in engineering components and structures during their entire operational life. This work presents the development of an experimental methodology for the generation, acquisition, processing, and interpretation of ultrasonic signals in composite materials through the implementation of a signal acquisition, processing and storage interface using the commercial software LabVIEW®. The use of the virtual instrument developed allows the monitoring and capture of signals by implementing different filters during the inspection. Finally, an analysis of the captured signals is shown using the Fast Fourier Transform, FFT, to determine the frequency components of the signal, implementing a function developed in MATLAB®.

**Keywords**— Composite materials, Nondestructive testing, Manufacturing, Structural components.

## I. INTRODUCCIÓN

Los materiales compuestos se forman combinando dos o más materiales que tienen propiedades bastante diferentes, y no se disuelven o mezclan entre sí, pero trabajan juntos para dar al compuesto propiedades únicas. Actualmente los materiales compuestos tienen gran aplicación en las industrias automotrices y aeronáutica, debido a sus propiedades anticorrosivas, livianas y de alta resistencia y representan aproximadamente un 50% de los materiales utilizados en un avión de pasajeros comercial, (BOEING, 2022). Sin embargo, a pesar de sus ventajas, los materiales compuestos son susceptibles a daños, como la delaminación, el agrietamiento de la matriz y la falla de sus fibras. Dichos daños, en algunos casos, generan una degradación significativa de las propiedades mecánicas de las estructuras, que puede conducir a fallas catastróficas, (Huang, L., Zeng, L., Lin, J., y Zhang, N., 2020). La detección de defectos en estas estructuras es difícil, ya que generalmente se producen y se propagan en la parte interna de las estructuras.

Actualmente, existen diversos métodos de Evaluación No Destructiva (END) disponibles para la detección de daños y el monitoreo de la salud estructural de estructuras de material compuesto. Recientemente, la aplicación de ondas guiadas, especialmente las ondas Lamb, se ha incrementado drásticamente para la inspección de estructuras tipo placa, fabricadas con materiales compuestos, (Yang, B., Xuan,

F. Z., Chen, S., Zhou, S., Gao, Y., y Xiao, B. 2017).

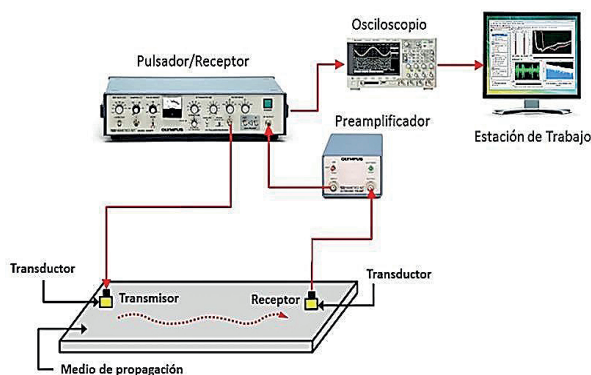
Las técnicas investigadas en la actualidad incluyen principalmente emisión acústica, ondas ultrasónicas, acusto-ultrasónicas, ultrasónicas guiadas u ondas Lamb, (C. Treesatayapun, 2009). Las técnicas de inspección basadas en ondas ultrasónicas Lamb tienen las ventajas de ahorrar tiempo, son fáciles de implementar y sensibles a una variedad de defectos, por lo que atraen una gran atención para la detección de daños en estructuras fabricadas con materiales compuestos, (Xu, C., Yang, Z., Zhai, Z., Qiao, B., Tian, S., y Chen, X., 2019), (Xu, C., Yang, Z., Tian, S., y Chen, X., 2019).

A pesar de las ventajas de las técnicas de evaluación no destructiva, la propagación de ondas ultrasónicas guiadas en materiales compuestos anisotrópicos como CFRP (polímero reforzado con fibra de carbono) atenúan las señales del ultrasonido, dificultando su propagación. Este trabajo muestra el desarrollo de una metodología experimental para el procesamiento e interpretación de señales ultrasónicas en materiales compuestos, basada principalmente en el buen desarrollo experimental para la generación y captura de señales mediante la implementación de una interfaz utilizando el software comercial LabVIEW®. El uso del instrumento virtual desarrollado permite el monitoreo y captura de señales implementando diferentes filtros durante la inspección. Finalmente se muestra un análisis de las señales

capturadas utilizando la transformada rápida de Fourier, FFT por sus siglas en inglés, para determinar los componentes de frecuencia de la señal, implementando una función desarrollada en MATLAB®.

## II. METODOLOGÍA

Para el desarrollo experimental en el proceso de adquisición de señales ultrasónicas, se utilizó el equipo de laboratorio que pertenece al grupo de investigación del Laboratorio de Evaluación No Destructiva (LabEND) de la División de Ingenierías, Campus Irapuato-Salamanca (DICIS) de la Universidad de Guanajuato, ver Figura 1.



**Figura 1.** Equipo de generación y adquisición de ondas ultrasónicas. Fuente: Autores.

Antes de la manipulación y conexión del equipo es necesario conocer los pasos necesarios para conectar y así poder encender el equipo pulsador – receptor:

- Se deberá evitar a toda costa, el doblar demasiado o enredar los

cables de color azul, que sirven para transmitir los pulsos sonoros.

- El equipo debe colocarse sobre una superficie firme y estable, para minimizar el riesgo de caídas.

También es necesario conocer los pasos para conectar y poder encender el osciloscopio. Antes de la manipulación de equipo hay puntos importantes a tener en cuenta:

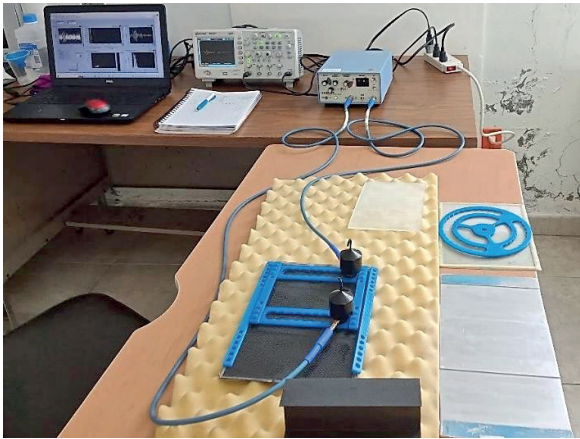
- Es un equipo de precisión y requiere ser manipulado con cuidado.
- Se deberá evitar a toda costa, el doblar demasiado o enredar los cables que conectan las puntas pasivas con el osciloscopio.

La metodología se implementó al obtener resultados de pruebas experimentales preliminares, donde se encontró señales de baja amplitud y frecuencia en estos materiales, lo que llevó a la necesidad de implementar filtros para lograr observar y capturar la mayor información posible de la inspección con ultrasonido.

Una vez conectado el equipo de adquisición y captura de señales ultrasónicas, se sincronizó con una placa de material conocido, de preferencia aluminio. Las características de propagación de ondas ultrasónicas en aluminio son conocidas, por lo que los parámetros de calibración del equipo de generación de señales será más sencillo de ajustar, esto con el fin de disminuir el error, y no capturar alguna

señal que se esté generando por error o mala conexión de los transductores.

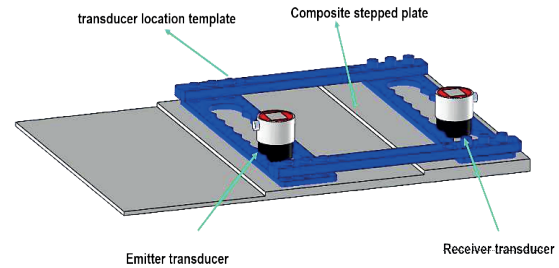
Antes de ubicar los transductores, se lubricó con glicerina las posiciones para que el contacto fuera más adecuado, también en el desarrollo experimental fue necesario garantizar el buen posicionamiento y acoplamiento de los transductores, por lo que se utilizó pesos iguales en los transductores emisor y receptor, garantizando la misma presión necesaria para generar las vibraciones mecánicas, ver Figura 2.



**Figura 2.** Desarrollo experimental de la inspección de materiales compuestos. Fuente: Autores.

Las placas planas y escalonadas de materia compuesto de matriz polimérica se fabricaron reforzadas con fibra de vidrio y de carbono, en el laboratorio de materiales compuestos de la Universidad de Guanajuato campus DICIS. Las plantillas de color azul que se muestran en la Figura 2, fueron fabricadas en Polyethylene terephthalate glicol (Pet-G), con una impresora AnyCubic® I3 Mega, que pertenece al grupo de investigación de evaluación no destructiva.

Se utilizó una base de espuma para que las placas de material compuesto no hagan contacto directo con la mesa de trabajo, lo cual es rígida y podría inducir ruido en la señal de ultrasonido generada, ver Figura 2.



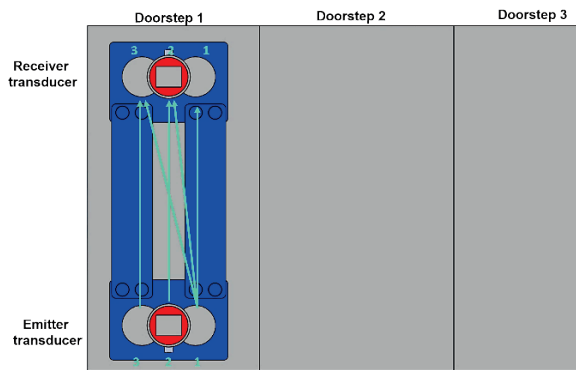
**Figura 3.** Ubicación de los transductores ultrasónicos. Fuente: Autores.

La propagación de ondas ultrasónicas guiadas en materiales compuestos reforzados con fibra de vidrio y de carbono es mucho más complicada que en los materiales isotrópicos como el aluminio, por lo que una estrategia es dirigir la inspección en la dirección de las fibras con las que se fabricaron estos materiales compuestos. Las orientaciones principales de las fibras son  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  y  $90^\circ$ , estas distancias son estratégicas para el posicionamiento de los transductores, sin embargo, es conveniente realizar inspección en posiciones diferentes como entre los ángulos mencionados buscando analizar el factor de atenuación de la señal, ver Figura 3.

Una parte importante de la metodología de inspección de materiales compuestos es analizar los cambios de amplitud de la señal ultrasónica en diferentes espesores y entre los espesores de las placas escalonadas, ya que en la industria algunas piezas de



materiales compuestos tienen espesores diferentes en una misma pieza. Como referencia, se realizó análisis en el espesor más bajo de las piezas de material compuesto, ver Figura 4, ya que se conoce de pruebas preliminares, que la señal es de más baja amplitud en función como disminuya el espesor de la placa. Esto dificulta la observación y monitoreo de la señal, que intenta confundirse entre el ruido generado en la inspección.



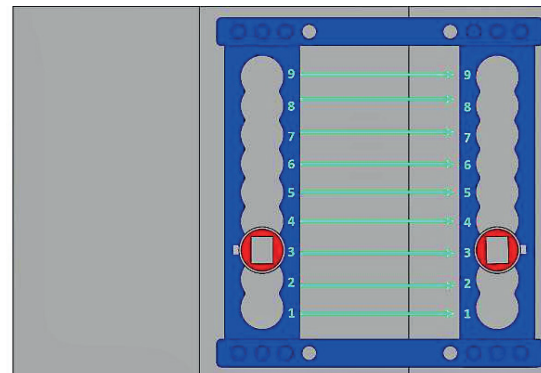
**Figura 4.** Método de inspección en el escalón 1. Fuente: Autores.

La inspección de un escalón se realizó en dos partes, como se muestra en la Figura 4. La primera ubicando los transductores emisor y receptor en las posiciones (1-1), (2-2) y (3-3), el método se llama "parallel projection", y permite observar la señal a la misma distancia en partes diferentes del mismo espesor. La segunda fue posicionando de forma fija el transductor emisor en la posición (1) y moviendo el transductor receptor en las posiciones (1), (2) y (3), respectivamente, esto permitió observar y evaluar el factor de atenuación de la señal. Después se ubicó el transductor emisor en la posición (2) y se movió el transductor receptor en las posiciones (1),

(2) y (3), y se repitió para la posición (1) del transductor emisor.

La posición de los transductores emisor y receptor se invirtió, con el fin de observar qué diferencias hay entre cambiar la función de emitir y recibir la señal ultrasónica.

El método de inspección entre escalones también se realizó en dos partes para tener más información en el comportamiento de la señal cuando atraviesa el escalón. La primera fue el "parallel projection", como se muestra en la Figura 5, que consistió en cambiar de posición los transductores emisor y receptor al tiempo en las siguientes posiciones, (1-1), (2-2), (3-3), (4-4), (5-5), (6-6), (7-7), (8-8) y (9-9). Esto permitió evaluar que tan similar son las señales tomadas a la misma distancia en la placa dentro del mismo escalón de interés.



**Figura 5.** Primer método de inspección entre escalones. Fuente: Autores.

Este mismo método se aplicó entre los escalones 1 y 2, y también se invirtió la posición del emisor receptor tomando las mismas lecturas. Esta información

es importante para aplicar métodos estadísticos para analizar la distribución y variación de las señales. El segundo método de inspección entre escalones, se realizó dejando fijo el transductor emisor en la posición (1) y variando la ubicación del transductor receptor en las posiciones (1), (2), (3), (4), (5), (6), (7), (8) y (9).

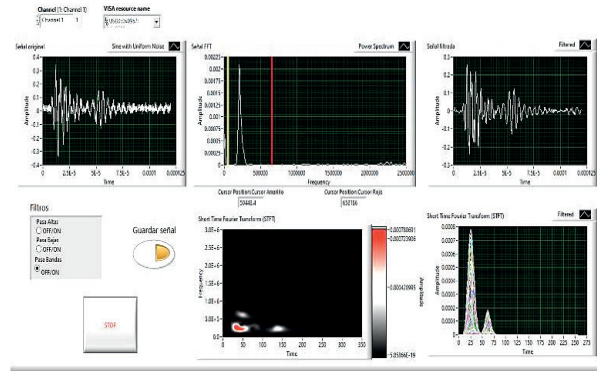
Este mismo procedimiento se realizó variando de posición el transductor emisor en las nueve posiciones y por cada posición se varió las nueve ubicaciones el transductor receptor.

Todo el procedimiento se repitió invirtiendo de posición los transductores emisor y receptor, capturando 81 señales para el segundo método y en total de captura de señales entre cada escalón fue 180 señales.

### III. RESULTADOS

Con el fin de realizar una buena inspección, basada en el monitoreo y captura de las señales ultrasónicas en el instante de la experimentación, se desarrolló una interfaz mediante el instrumento virtual de captura de LabVIEW®, como se muestra en la Figura 6.

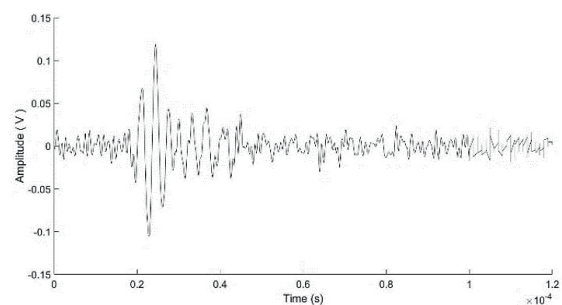
Es necesario realizar un análisis en función de la frecuencia, que permita extraer información que no es evidente mediante la simple observación de una señal en el tiempo. De tal forma, se implementará la Fast Fourier Transform (FFT), que muestra un espectro de frecuencias de la señal original.



**Figura 6.** interfaz de adquisición, pre-procesamiento y almacenamiento de señales. Fuente: Autores.

Los filtros se podrán emplear en cualquier sección de la FFT, pero lo recomendable fue monitorear la señal por debajo de 1 MHz, ya que esa es la capacidad de los transductores que se emplearon, esto se logró con el movimiento de unos cursores, que se ajustan en intervalos de la señal.

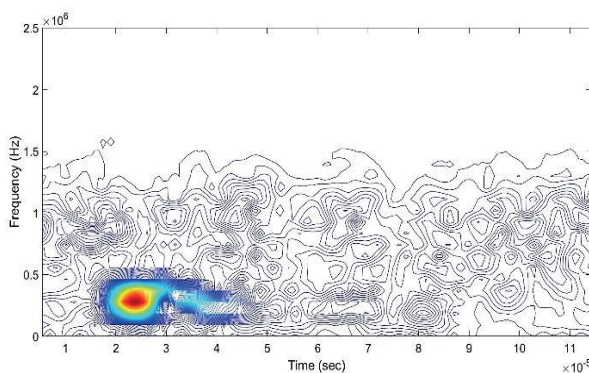
Uno de los factores importantes a estudiar es la amplitud que se atenúa en función del cambio de espesor y la distancia de inspección, una señal característica de propagación de ondas ultrasónicas en materiales compuestos con fibra de carbono se muestra en la Figura 7.



**Figura 7.** Señal en función de la amplitud y tiempo. Fuente: Autores.

Al sincronizar el equipo de generación y adquisición de señales ultrasónicas con accesorios, interfaz de LabVIEW® para el pre-procesamiento y filtrado al mismo tiempo con la metodología que se desarrolló en MATLAB® para el post-procesamiento, forman una plataforma experimental, en conjunto forma una metodología experimental para la evaluación no destructiva basada en ondas ultrasónicas guiadas sobre placas fabricadas con materiales compuestos.

Se empleó análisis y diseño de experimentos para el tratamiento de datos, encontrando parámetros ideales para la calibración de los equipos de generación de ondas ultrasónicas, que nos permitieron observar y capturar la mejor señal posible, en la búsqueda de poder caracterizar la propagación de ondas ultrasónicas guiadas en materiales compuestos.



**Figura 8.** Gráfica Short Time Fourier Transform (STFT). Fuente: Autores.

La metodología permitió analizar los datos en el dominio de la frecuencia y el tiempo-frecuencia, con magnitudes de frecuencia por debajo de 1 MHz, como se muestra en la Figura 12. La

gráfica Short Time Fourier Transform (STFT), muestra un análisis en el dominio de la frecuencia de como vibran las ondas en el material, ver Figura 8.

#### IV. CONCLUSIONES Y COMENTARIOS

Los materiales compuestos reforzados con fibras de vidrio y de carbono, en comparación a las muestras de aluminio, necesitan una mayor ganancia de vibración en el sistema de generación de señales ultrasónicas como el pulsador-receptor transmitida a través de los transductores que generan las señales de ultrasonido que se propagan como vibración mecánica en el material.

La propagación de las ondas ultrasónicas en materiales compuestos reforzados con fibras de vidrio y de carbono, se propagan de mejor forma en dirección de las fibras con las que se fabricaron estos materiales.

El valor de la frecuencia en las inspecciones de los materiales compuestos utilizando ultrasonido están cercanos a 0.5 MHz, especialmente los reforzados con fibra de vidrio y fibra de carbono, lo que indica que la técnica de inspección con transductores de 1 MHz es apropiada para observar y almacenar señales claras y definidas en amplitud y tiempo.

Resaltar la importancia de las metodologías de pre y post procesamiento de señales, con el fin de tener mejor información de las señales en las inspecciones no destructivas para los



materiales compuestos, arrojan información importante gracias al buen filtrado en señales de baja amplitud.

Los sensores piezoeléctricos son elementales en inspección y análisis de ondas ultrasónicas, por sus características de propagación en los materiales, tener una buena conexión, manipulación e interpretación es de vital importancia para evitar generar y registrar errores.

## V. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a CONACYT por el soporte en los estudios de posgrado, a través de la beca 737499 y a la División de Ingenierías, Campus Irapuato-Salamanca (DICIS) de la Universidad de Guanajuato, por la infraestructura proporcionada para la realización de este proyecto.

## VI. REFERENCIAS

- [1] BOEING (agosto de 2022). *Advanced Composite Use. (787 DREAMLINER BY DESIGN)* Obtenido de <https://www.boeing.com/commercial/787/by-design/#/advanced-composite-use>
- [2] Treesatayapun, C., Baltazar, A., Balvantín, A., y Kim, J. Y. (2009, March). THICKNESS DETERMINATION OF A PLATE WITH VARYING THICKNESS USING AN ARTIFICIAL NEURAL NETWORK FOR TIME-FREQUENCY REPRESENTATION OF LAMB WAVES. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 1096, No. 1, pp. 619-626). American Institute of Physics
- [3] Huang, L., Zeng, L., Lin, J., y Zhang, N. (2020). Baseline-free damage detection in composite plates using edge-reflected Lamb waves. *Composite Structures*, 247, 112423.
- [4] Osorio, J. A. C., Vargas, J. A. M., y Escobar, J. A. M. (2010). Alternativa al análisis en frecuencia de la FFT mediante el algoritmo Goertzel. *Scientia et Technica*, 1(44), 217-222.
- [5] *Soluciones NI*. (05 de agosto de 2022). Obtenido de: <https://www.ni.com/es-mx/shop/labview.html>
- [6] Xu, C. B., Yang, Z. B., Zhai, Z., Qiao, B. J., Tian, S. H., y Chen, X. F. (2019). A weighted sparse reconstruction-based ultrasonic guided wave anomaly imaging method for composite laminates. *Composite Structures*, 209, 233-241.
- [7] Xu, C., Yang, Z., Tian, S., y Chen, X. (2019). Lamb wave inspection for composite laminates using a combined method of sparse reconstruction and delay-and-sum. *Composite Structures*, 223, 110973.
- [8] Yang, B., Xuan, F. Z., Chen, S., Zhou, S., Gao, Y., y Xiao, B. (2017). Damage localization and identification in WGF/epoxy composite laminates by using Lamb waves: Experiment and simulation. *Composite Structures*, 165, 138-147.