




**IMPLEMENTACIÓN Y EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DEL ALGORITMO DE
COMPENSACIÓN DE LA DISPERSIÓN APLICADO EN ONDAS GUIADAS TIPO
LAMB**

JULIETH PAOLA RIAÑO MORENO

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-MECANICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES**

Bucaramanga

2016



**IMPLEMENTACIÓN Y EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DEL ALGORITMO DE
COMPENSACIÓN DE LA DISPERSIÓN APLICADO EN ONDAS GUIADAS TIPO
LAMB**

JULIETH PAOLA RIAÑO MORENO

**Trabajo de Grado para optar al título de
Ingeniera Electrónica**

Director

PhD. Rodolfo Villamizar Mejía

Co-Director

MIE. Jabid Eduardo Quiroga Méndez

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-MECANICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES**

Bucaramanga

2016

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por darme la oportunidad de vivir y por estar conmigo en cada paso que doy, por fortalecer mi corazón e iluminar mi mente.

A mis padres Luz Amparo Moreno y Pedro Alonso Riaño, por ser mi mejor ejemplo, que con su apoyo incondicional, dedicación y esfuerzo han sido el camino para poder llegar a este punto de mi carrera. Los amo inmensamente.

A Edwin Vargas, por hacer parte de mi vida en esta linda etapa, por su cariño y amor, por cada palabra de aliento recibida en los momentos donde las cosas se tornaban difíciles y sobre todo por luchar juntos por este mismo sueño. Gracias por su apoyo.

A mi familia que ha estado presente desde el momento en que decidí enfrentar este reto.

A mis amigas y compañeros de la universidad que han sido testigos de todo este proceso. Gracias por confiar en mí.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	14
1.1 JUSTIFICACIÓN	15
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
1.4. ORGANIZACIÓN DEL TRABAJO	16
2. ANTECEDENTES	17
3. CONCEPTOS TEÓRICOS	20
3.1 ULTRASONIDOS	20
3.1.1 Tipos de ondas de ultrasonido	21
3.2 INSPECCIÓN POR ONDAS GUIADAS LAMB.....	24
3.3 DISPERSIÓN Y COMPENSACIÓN DE LA DISPERSIÓN.....	26

4.	IMPLEMENTACIÓN NUMÉRICA	29
5.	RESULTADOS NUMÉRICOS	33
5.1	METODOLOGÍA.....	33
5.2	RESULTADOS.....	35
5.2.1	Curvas de dispersión.....	35
5.2.2	Señal de excitación y frecuencia de operación.....	36
5.2.3	Señal dispersa y señal compensada.....	37
5.2.4	Correlación, señal de error y norma L2.....	38
5.3	EVALUACIÓN ESTADÍSTICA.....	39
5.3.1	Prueba de hipótesis.....	39
5.3.2	Comparación de las señales usando la norma L2.....	40
6.	DISCUSIÓN.....	44
7.	CONCLUSIONES.....	45
	REFERENCIAS	46
	BIBLIOGRAFÍA.....	49
	ANEXOS.....	50

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema del movimiento oscilatorio de las ondas longitudinales. Tomada de [19].....	21
Figura 2. Esquema del movimiento oscilatorio de las ondas transversales. Tomada de [19].....	22
Figura 3. Esquema del movimiento oscilatorio de las ondas rayleigh. Tomada de [19].....	23
Figura 4. Esquema del movimiento oscilatorio de las ondas de Lamb. Tomada de [19].....	24
Figura 5. Análisis mediante ondas de Lamb por el método emisión-recepción. Tomada de [17].....	25
Figura 6. Análisis mediante ondas de Lamb por el método pulso-eco. Tomada de [17].....	26
Figura 7. Ejemplo de la propagación de una señal de dispersión para el modo de onda de Lamb S0 en una placa de aluminio de 1mm de espesor. a) señal de excitación tonoburts de 5 ciclos con frecuencia central de 1MHz. b) señal recibida a 50mm de la fuente(emisor) c) señal recibida a 100mm de la fuente(emisor). Tomada de [13].....	29
Figura 8. Diagrama esquemático de la placa (sistema simulado). Tomado de [17].....	35
Figura 9. Curvas de dispersión de una placa de acero de 5mm de espesor.....	36
Figura 10. Señal de excitación toneburts de 5 ciclos con enventanadado Hanning y frecuencia central de 265[kHz].....	37

Figura 11. Resultados de la señal dispersa y la señal compensada para una placa de acero de 5mm de espesor con excitación del modo S0 y una distancia de propagación de 2m.....37

Figura 12. Alineación de las señal de excitación y señal compensada para una placa de acero de 5mm de espesor bajo las condiciones del escenario 1.....38

Figura 13. Gráficas de Norma L2 Vs Distancia de propagación.....,40

Figura 14. Gráficas de Norma L2. (a) Norma L2 Vs Distancia de propagación para las señales del escenario 3. (b) Norma L2 Vs Espesor de la placa para las señales del escenario 4.....41

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades elásticas de las placas utilizadas.	35
Tabla 2. Resultados de las pruebas estadísticas.....	39

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A: Tabla de resultados de los coeficientes de correlación variando la distancia de propagación.....	50
ANEXO B: Tabla de resultados de los coeficientes de correlación variando el espesor de las placas	51
ANEXO C: Tabla de resultados de la norma L2 de la señal dispersa y la señal compensada variando la distancia de propagación	52
ANEXO D: Tabla de resultados de la Norma L2 para las señales de error en cada una de las pruebas variando el espesor de las placas	53
ANEXO E: Tabla de resultados de la Norma L2 para las señales de error en cada una de las pruebas variando la distancia de propagación	54
ANEXO E: Tabla de resultados de la Norma L2 para las señales de error en cada una de las pruebas variando el espesor de las placas	55

RESUMEN

Título:

Implementación y evaluación del desempeño del algoritmo de compensación de la dispersión aplicado en ondas guiadas tipo Lamb ¹

Autor: Julieth Paola Riaño Moreno²

Palabras Claves: Ondas de Lamb, dispersión, compensación de la dispersión, velocidad de fase, velocidad de grupo.

El desarrollo de un sistema de inspección de estructuras es un tema de gran interés tanto en ingeniería como en el ámbito científico. Estos sistemas se basan en diversas técnicas de ensayos no destructivos en las que se destaca la inspección por ondas guiadas de Lamb, debido a la capacidad de estas ondas para propagarse largas distancias con baja atenuación y sensibilidad a cambios estructurales. Sin embargo, el uso de este tipo de ondas en los procesos de inspección se puede ver afectado debido a la naturaleza dispersiva de las ondas. Este trabajo se basa en la evaluación del desempeño del método de compensación de la dispersión propuesto por Paul Wilcox en [5], este es un algoritmo de procesamiento de señales que hace uso de las características de dispersión de un modo de propagación de onda Lamb para mapear las señales dispersas en el dominio del tiempo al dominio de la distancia. En el proceso las señales dispersas se comprimen a la forma de la señal de excitación. En el trabajo se utilizan señales sintéticas y se propone una metodología que permite evaluar tanto el comportamiento de la dispersión como el desempeño del algoritmo de compensación de la dispersión propuesto en [5] mediante una evaluación estadística.

¹ Trabajo de Grado modalidad en investigación

² Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Director: PhD. Rodolfo Villamizar Mejía. Codirector: Jabid Eduardo Quiroga Méndez.

ABSTRACT

TITLE:

Implementation and performance evaluation algorithm dispersion compensation applied in guided wave type Lamb.³

AUTHOR: Julieth Paola Riaño Moreno⁴

KEYWORDS: Lamb waves, dispersion, dispersion compensation, phase velocity, group velocity.

The development of a system of inspection structures is an issue of great interest both in engineering and science. These systems are based on various non-destructive testing techniques in which the inspection guided Lamb waves stands out because of the ability of these waves to propagate long distances with low attenuation and sensitivity to structural changes. However, the use of such waves in the inspection processes can be affected due to the dispersive nature of the waves. This work is based on the performance evaluation method of dispersion compensation proposed by Paul Wilcox in [5], this is an algorithm signal processing that uses the dispersion characteristics of a propagation mode Lamb wave to map the scattered signals in the time domain to the domain of distance. In the process the scattered signals are compressed to the shape of the excitation signal. At work synthetic signals are used and a methodology to assess both the behavior of the

³ Degree Project

⁴ Faculty of Physics Mechanics Engineering. Electrical, Electronics Engineering and Telecommunications School. . Director: PhD. Rodolfo Villamizar Mejía. Codirector: Jabid Eduardo Quiroga Méndez.

dispersion and algorithm performance dispersion compensation proposed in [5] by a statistical evaluation is proposed.

INTRODUCCIÓN

Las ondas de Lamb son ondas guiadas que se propagan en estructuras sólidas con geometría tipo placa delgada. Estas ondas han sido estudiadas en el campo de los ensayos no destructivos debido a su capacidad para propagarse largas distancias con baja atenuación y sensibilidad a cambios estructurales. Son utilizadas en los procesos de inspección para la detección de discontinuidades, evaluación de la corrosión y deterioro por agentes ambientales en placas y tuberías [1].

Sin embargo, su uso en los procesos de inspección se complica por la naturaleza dispersiva y multimodal de este tipo de ondas. La dispersión es el fenómeno por el cual los diferentes componentes de frecuencia de una onda se propagan con diferentes velocidades; desde un punto de vista práctico, puede interpretarse como una reducción de amplitud y un aumento en la duración del paquete de ondas, estos cambios en la forma de onda hacen que los datos experimentales sean difíciles de interpretar lo que dificulta los procesos de inspección. Para minimizar el efecto de la dispersión se han desarrollado diversos métodos: diseño óptimo de la señal de excitación [2], técnicas de inversión de tiempo [3], representación tiempo-frecuencia [4] y compensación de la dispersión [5]. Usando cualquiera de estas técnicas la dispersión puede ser reducida o incluso eliminada completamente.

El presente trabajo se basa en la evaluación del desempeño del método de compensación de la dispersión propuesto por Paul Wilcox en [5], este es un algoritmo de procesamiento de señales que hace uso de las características de dispersión de un modo de propagación de onda Lamb para mapear las señales

dispersas en el dominio del tiempo al dominio de la distancia. En el proceso las señales dispersas se comprimen a la forma de la señal de excitación.

La metodología propuesta para el desarrollo del trabajo es: simular la propagación de las ondas guiadas de Lamb en placas de diferentes materiales, aplicar el algoritmo de compensación de la dispersión a la señal resultante de la simulación y finalmente evaluar los resultados de la compensación. Como método de evaluación se propone realizar una comparación entre la señal de excitación y la señal compensada que permita establecer la similitud entre las dos señales.

1.1 JUSTIFICACIÓN

La condición de dispersión inherente en la propagación de las ondas guiadas de Lamb, ha demostrado ser un problema para la utilización de estas ondas en los procesos de inspección. El desafío está en minimizar o eliminar su efecto. Con la realización de este trabajo se pretende aportar a los grupos de investigación en la línea de ensayos no destructivos de la Universidad Industrial de Santander una herramienta que permita eliminar el efecto de la dispersión que se presenta en la propagación de ondas de Lamb, con el fin de que pueda ser implementado a futuro en un sistema real de inspección.

1.2 OBJETIVO GENERAL

Disminuir el efecto de la dispersión que se presenta en señales de ondas guiadas tipo Lamb que se propagan en placas de diferentes materiales.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Implementar el algoritmo propuesto por Paul Wilcox para disminuir el efecto de dispersión que se presenta en la propagación de ondas guiadas tipo Lamb.
- Evaluar el desempeño del algoritmo de compensación de la dispersión.

1.4 ORGANIZACIÓN DEL TRABAJO

El trabajo está estructurado en siete capítulos principales:

- En el capítulo 1 se muestra un resumen del trabajo, junto con la justificación y los objetivos.
- En el capítulo 2 se presenta una descripción de investigaciones previas al desarrollo de éste trabajo.
- En el capítulo 3 se presentan los conceptos importantes referentes al contenido de este trabajo: ultrasonidos, ondas de Lamb, dispersión y compensación de la dispersión.
- En el capítulo 4 se describen los detalles de la implementación numérica realizada.
- En el capítulo 5 se presentan los resultados numéricos del trabajo realizado. Además se presenta una evaluación estadística del desempeño del algoritmo de compensación de la dispersión.
- En el capítulo 6 se presentan las discusiones y posibles trabajos futuros.
- En el capítulo 7 se presentan las conclusiones principales que se deducen del trabajo realizado.

2. ANTECEDENTES

Los primeros estudios de propagación de ondas en placas fueron llevados a cabo por Horacio Lamb en 1917 seguido por Lord Rayleigh en 1945 [6], [7]. Daniel Worlton es el primero en confirmar y generar este tipo de ondas, también es el primero en darse cuenta de las múltiples ventajas de la utilización de este tipo de ondas para la detección de defectos en placas [8]. Calculó las curvas de dispersión del aluminio y el circonio para describir analíticamente las características de varios modos que permitirían su uso en aplicaciones de ensayos no destructivos.

En 1967, Viktorov, basándose en todas las investigaciones realizadas de las ondas de Lamb como un tipo de perturbación elástica capaz de propagarse en una placa sólida con condiciones de contorno libres. En su trabajo estudió la propagación de estas ondas y propuso un método para la solución de las ecuaciones de onda Lamb.

En la década de los 70 muchos investigadores se dedicaron al estudio de las ondas Lamb. Entre los que se destacan:

- En 1969, Louis J. Demer y Louis H. Fentnor pusieron en práctica la primera aplicación aeroespacial [9]. En su trabajo consideraron las ondas Lamb como una de las mejores maneras de obtener información sobre la densidad, propiedades elásticas y espesor del medio. Sus investigaciones se centraron en la propagación de ondas Lamb en láminas metálicas delgadas y formas cilíndricas.

- Shewring en 1973 y Mansfield en 1975, investigaron la aplicación de ondas guiadas en diferentes placas y tiras de aluminio.

Durante los años 90 se siguió desarrollando el uso de ondas guiadas Lamb, sin embargo, tuvo un mayor desarrollo en el campo de los ensayos no destructivos:

- En 1994, Michael Lowe estudió la inspección del grado de adhesión y difusión de juntas por técnicas de ondas guiadas Lamb. En su publicación [10] encontró que estas, son sensibles tanto a las propiedades del material como al espesor de la capa de pegado.
- En 1995, Joseph L. Rose empleó ondas guiadas para la inspección ultrasónica de uniones de estructuras, desarrollando un transductor específico para emitir y recibir ondas de Lamb [11].

Desde entonces ha surgido un notable interés por el uso de ondas guiadas Lamb en aplicaciones de ensayos no destructivos:

- En 1998, Paul Wilcox en [12] empleó ondas Lamb para la inspección de grandes estructuras metálicas usando transductores fijos. Dos años más tarde, en [13] estudia el efecto de la dispersión en la inspección de largo alcance mediante ondas guiadas. En su trabajo demuestra que la duración de un paquete de onda aumenta linealmente con la distancia de propagación. También que la duración de un paquete de onda después de una distancia de propagación puede ser minimizada mediante la optimización de la señal de entrada.
- En los años 2001 y 2003, el mismo Wilcox presenta en [14] y [5] una técnica de procesamiento de señal para remover el efecto de la dispersión de señales de ondas guiadas. La técnica implementa un algoritmo que permite la compresión de la señal dispersa de un modo de propagación a la forma

original de la señal de entrada. Sus pruebas se basaron en la propagación de los modos de onda S0 en una placa de aluminio, en varillas con y sin abrazaderas.

- Entre los años 2003 y 2006 Víctor Giurgiutiu y Liu en sus publicaciones [15] y [16] respectivamente, comprobaron mediante simulaciones por elementos finitos, que los modos de Lamb son sensibles a varios tipos de defectos. Verificaron que el modo simétrico S0 es más sensible a las grietas que atraviesan todo el espesor. También estudian el fenómeno de la dispersión que sufren los modos de propagación, mediante simulaciones demuestran como este fenómeno produce cambios en la forma de onda de la señal y esto dificulta los análisis en los procesos de identificación de defectos.

3. CONCEPTOS TEÓRICOS

3.1 ULTRASONIDOS

En [17] definen los ultrasonidos como ondas acústicas, y por tanto de tipo mecánico, que se propagan por todos los materiales mediante el movimiento armónico de sus moléculas. Reciben este nombre debido a que su frecuencia de vibración está por encima de la frecuencia audible, aproximadamente 20kHz. Se diferencian de las ondas electromagnéticas en que necesitan un medio para propagarse.

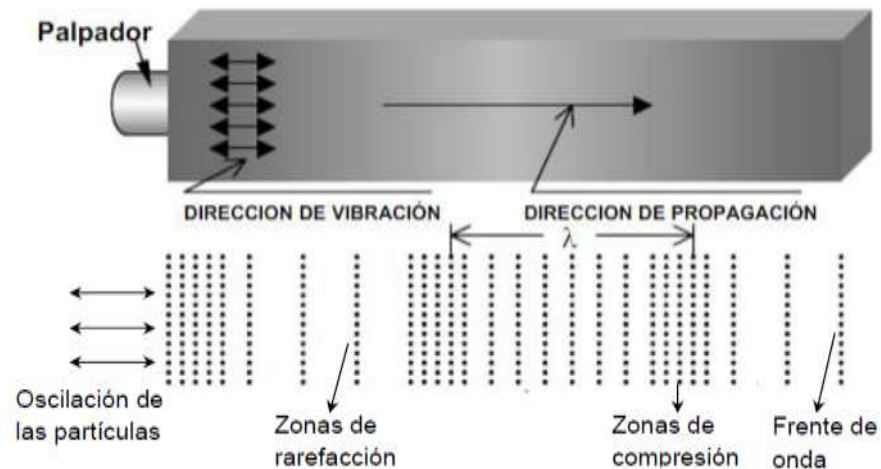
Existen diversas aplicaciones que utilizan las vibraciones ultrasónicas en medios sólidos, líquidos o gaseosos [18]. Estas aplicaciones pueden dividirse en dos grandes grupos. El primero grupo son las aplicaciones de potencia, se denominan así por la alta intensidad de las ondas ultrasónicas que se utilizan, algunas de estas aplicaciones son usadas en la medicina con fines terapéuticos (terapia ultrasónica) y en la industria para aceleración de reacciones químicas y limpieza de piezas.

El segundo son las aplicaciones de señal (ultrasonidos de baja intensidad), son aquellas que estudian los cambios producidos en las ondas ultrasónicas a su paso por un material para deducir las características mecánicas y geométricas de este. Algunas de estas aplicaciones son usadas en la medicina para el diagnóstico de enfermedades (ecografía ultrasónica), otras en aplicaciones industriales para la evaluación de defectos internos que permiten el control de calidad de estructuras. En lo que a este proyecto se refiere se estudiarán los cambios producidos en las ondas al propagarse en un sólido, específicamente estructuras tipo placa de aluminio, acero y titanio.

3.1.1 Tipos de ondas de ultrasonido en sólidos. Como se definió anteriormente, las ondas de ultrasonido no pueden propagarse en el vacío, necesitan de un medio que genere vibración [18]. En los cuerpos que poseen una estructura cristalina (por ejemplo metales en estado sólido) las partículas que forman la red pueden ser desplazadas de sus posiciones de equilibrio describiendo oscilaciones con trayectorias diversas en función de la energía mecánica aplicada, según sean estas oscilaciones, se generan distintos tipos de ondas.

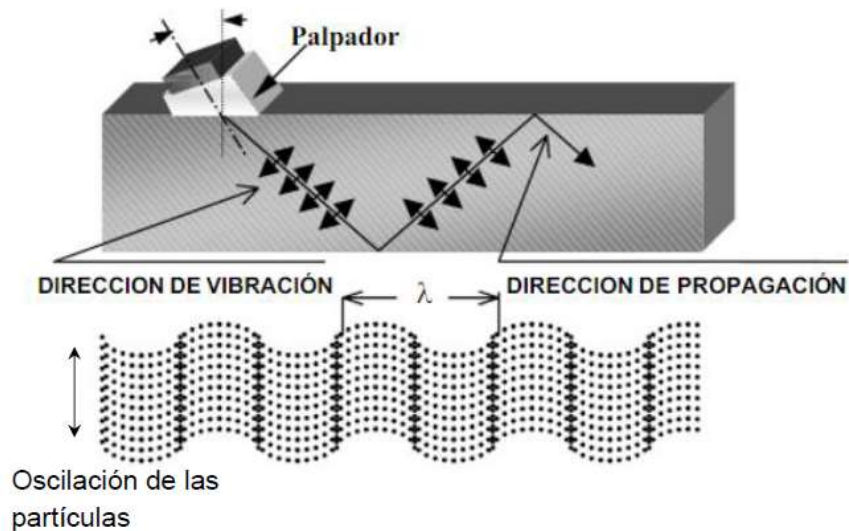
3.1.2 Ondas longitudinales. Se originan cuando la oscilación de las partículas tiene lugar en la misma dirección de propagación de la onda al ejercer presión perpendicularmente a la superficie del cuerpo (Figura1).

Figura 1: Esquema del movimiento oscilatorio de las ondas longitudinales. Tomada de [19].



3.1.3 Ondas transversales. Se originan cuando la dirección de oscilación de las partículas es perpendicular a la dirección de propagación de la onda ultrasónica (Figura2).

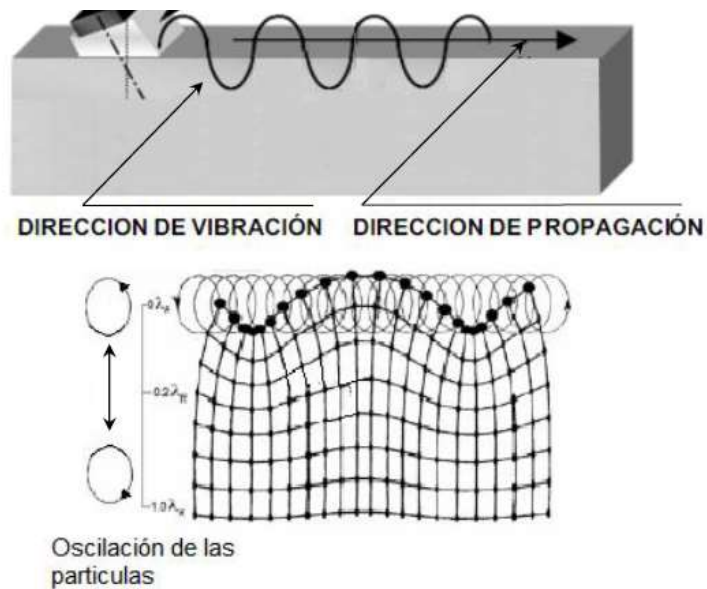
Figura 2: Esquema del movimiento oscilatorio de las ondas transversales. Tomada de [19].



A diferencia de las ondas longitudinales, para la propagación de las ondas transversales es necesario que cada partícula presente una elevada fuerza elástica de atracción con sus vecinas para lograr transmitir el movimiento oscilatorio (hacia arriba y hacia abajo), generando la propagación de la onda a través del material.

3.1.1.3 Ondas de Rayleigh. Se originan cuando el ángulo de incidencia del haz ultrasónico sobre el material tiene un valor tal que se alcanza el segundo ángulo crítico de refracción. Estas ondas se propagan solamente en la periferia plana o curva de un sólido, siguiendo las irregularidades de la superficie o contornos del mismo. El movimiento oscilatorio de las partículas del material es elíptico como se observa en la parte inferior de la Figura 3.

Figura 3: Esquema del movimiento oscilatorio de las ondas Rayleigh. Tomada de [19].

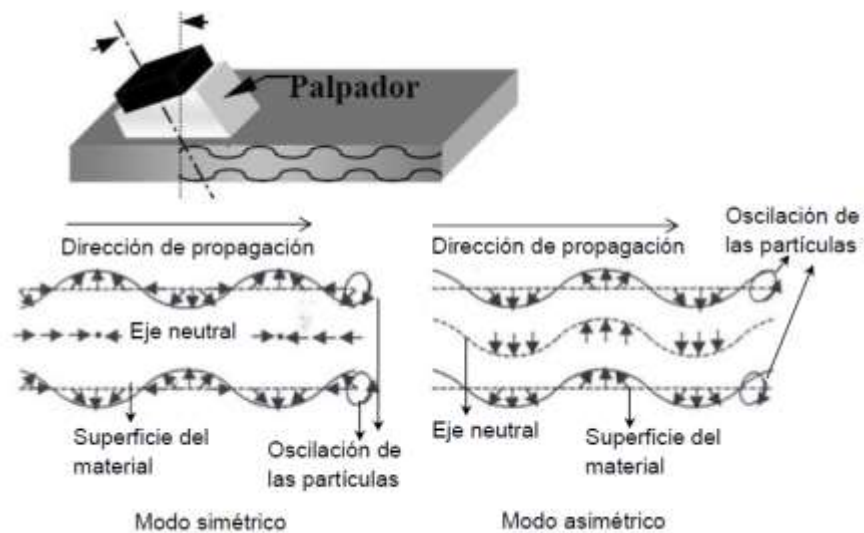


3.1.1.4 Ondas de Lamb. Las ondas de Lamb se obtienen en láminas delgadas y también en tubos cuyos espesores son aproximadamente del orden de la longitud de onda. según [1] la propagación de este tipo de ondas consiste en una vibración compleja de las partículas que ocurre dentro del espesor del material a ensayar. Las características de propagación de la onda Lamb dependen de la densidad, propiedades elásticas y la estructura del material, así como del espesor de la muestra y la frecuencia.

Existen dos modos fundamentales de este tipo de onda: modos simétricos o de compresión (S_0, S_1, S_2, \dots) y modos asimétricos o de flexión (A_0, A_1, A_2, \dots). La simetría o no de los modos de onda se refiere a la oscilación de las partículas con respecto a un eje de la pieza de ensayo. En los modos simétricos las partículas de la zona media o fibra neutra se comportan según oscilaciones longitudinales y en el caso

de los modos asimétrico según oscilaciones transversales. Las demás partículas del medio material oscilan en una combinación de ambos modos de vibración que da como resultado una forma elíptica. Dichos comportamientos se pueden observar en la Figura 4.

Figura 4: Esquema del movimiento oscilatorio de las ondas de Lamb. Tomada de [19].



3.2 INSPECCIÓN POR ONDAS GUIADAS LAMB

La inspección por ondas guiadas Lamb es una técnica de ensayo no destructivo utilizada para evaluar la pérdida de sección transversal debido a procesos de erosión o corrosión. El término ondas “guiadas” se debe a que estas viajan a través del medio “guiadas” por los límites geométricos de este. Algunas aplicaciones incluyen la inspección de placas de acero [20], tuberías [21],[22], y tendones de acero incrustados [23].

El principio de análisis en la inspección por ondas guiadas Lamb, consiste en el envío de una señal y la recepción de la misma después de recorrer una distancia de propagación. Existen dos métodos de medida: transmisión-recepción y pulso-eco [17]. El primer método consiste en excitar un transductor piezoeléctrico (emisor) en un punto de la estructura y analizar la señal recibida en otro transductor piezoeléctrico (receptor) situado a larga distancia del emisor como se muestra en la Figura 5.a. En este caso la señal recibida contiene información sobre la integridad de la estructura a lo largo de la distancia recorrida entre el emisor y el transmisor.

El segundo método de medida (pulso-eco) consiste en excitar un transductor piezoeléctrico y medir la señal recibida con él mismo o con otro transductor situado a poca distancia del emisor. En este caso la onda emitida por el piezoeléctrico emisor se propaga a lo largo de la estructura, siendo reflejada en las fronteras de la misma y volviendo al transductor emisor o a un receptor próximo (Figura 6.b). Las ondas de Lamb recibidas, después de haber recorrido la estructura, contienen información de la integridad de la misma.

Figura 5: Análisis mediante ondas de Lamb por el método emisión-recepción. Tomada de [17].

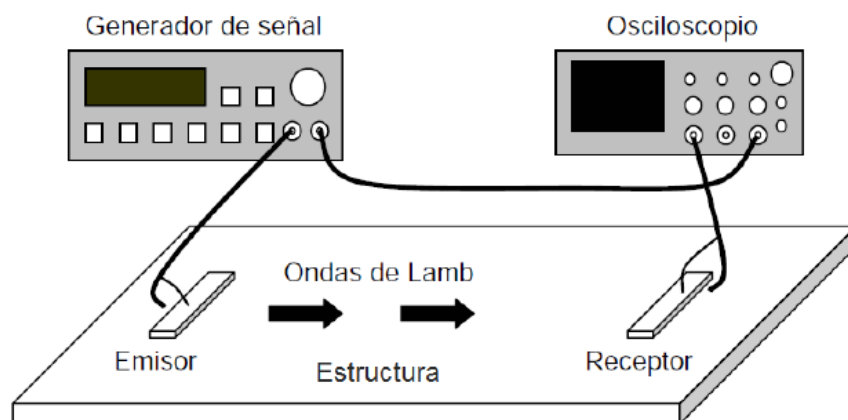
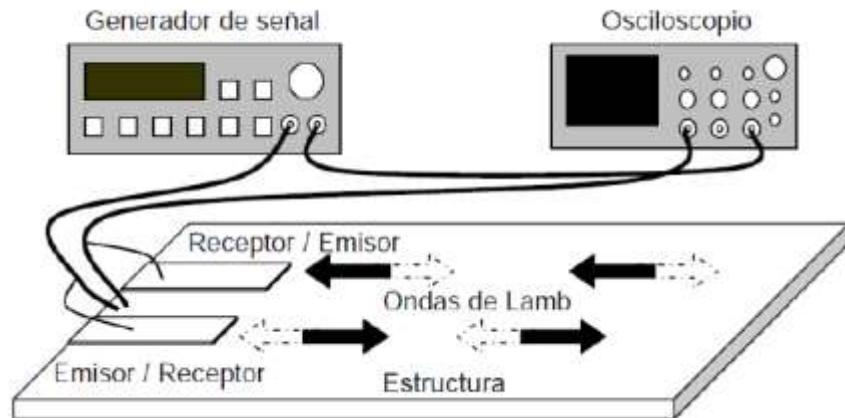


Figura 6: Análisis mediante ondas de Lamb por el método pulso-eco. Tomada de [17].



En los dos métodos de medida cualquier cambio en la sección transversal de la estructura como soldadura, erosión o corrosión, generalmente refleja o genera dispersión, lo cual permite detectar dichas anomalías en la estructura midiendo los cambios en la señal recibida [17]. Sin embargo, debido a que las ondas de Lamb son guiadas por los límites geométricos del medio (estructura), este tiene una fuerte influencia en el comportamiento de las ondas, especialmente en la velocidad, la cual varía significativamente con la frecuencia y la geometría del medio, confiriendo a este tipo de ondas un carácter dispersivo. Este fenómeno de dispersión dificulta el análisis de la señal recibida representando un problema en los procesos de inspección.

3.3 PROPAGACIÓN Y COMPENSACIÓN DE LA DISPERSIÓN DE ONDAS LAMB

En esta sección se describe en que consiste el efecto de la dispersión de la propagación de un solo modo en onda guiada en medios dispersivos mediante un análisis en frecuencia.

Considere que un sistema en modo emisión-recepción (Figura 5) configurado para la excitación y detección de un modo de onda guiada en particular, está acoplado a una estructura en la que las ondas de Lamb pueden propagarse. Según [14], si un transductor (emisor) es excitado con una señal $f(t)$ en un punto de la estructura $x = 0$, la señal medida por otro transductor (receptor) a una distancia x y un tiempo t está definida como:

$$g(t) = \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega)H(\omega)e^{j\omega t}d(\omega) \quad (3.1)$$

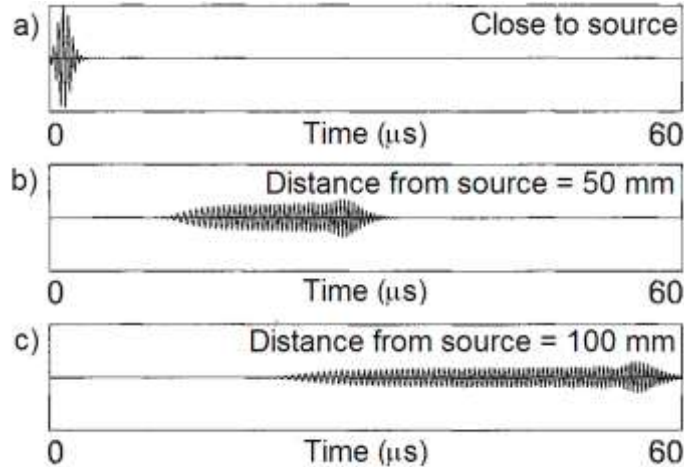
Donde

$$H(\omega) = e^{-jk(\omega)x}$$

Donde t es el tiempo, x_0 la distancia, $k(\omega)$ es el número de onda guiada en función de la frecuencia angular ω , y $F(\omega)$ es la transformada de Fourier de $f(t)$.

Según la propiedad de desplazamiento de Fourier, el término $H(\omega)$ en la ecuación 3.1 introducirá un tiempo de retraso a cada uno de los armónicos de $F(\omega)$ en función de la distancia x recorrida por la onda. Esto es bien conocido como el fenómeno de la dispersión, el cual se produce cuando los diferentes componentes de frecuencia de una onda se propagan con diferentes velocidades y que se ve reflejado en un tiempo de llegada diferente para cada componente de frecuencia. Un ejemplo de una señal con dispersión se puede observar en la Figura 7.

Figura 7: Ejemplo de la propagación de una señal de dispersión para el modo de onda de Lamb S0 en una placa de aluminio de 1mm de espesor. a) Señal de excitación toneburts de 5 ciclos con frecuencia central de 1MHz. b) señal recibida a 50mm de la fuente (emisor) c) señal recibida a 100mm de la fuente (emisor). Tomada de [13]



El objetivo es convertir la señal dispersa $g(t)$ a una señal en función de la distancia de propagación y comprimir el efecto de la dispersión. Intuitivamente, el proceso inverso o compensación de la dispersión de una señal recibida por un transductor a una distancia x , consiste en propagar esta señal hacia atrás hasta un tiempo inicial $t=0$ pero haciendo una corrección de fase a la señal $g(t)$ con el término $H^{-1}(\omega)=e^{jk(\omega)x}$, Paul Wilcox en [5] resume este principio en la siguiente ecuación:

$$h(x) = \int_{-\infty}^{\infty} G(\omega)H^{-1}(\omega)d\omega \quad (3.2)$$

Remplazando el término de corrección de fase $H^{-1}(\omega) = e^{ik(\omega)x}$, la ecuación 3.2 resulta en:

$$h(x) = \int_{-\infty}^{\infty} G(\omega)e^{-jk(\omega)x} d\omega \quad (3.2)$$

Donde x_0 es la distancia, $k(\omega)$ es el número de onda guiada en función de la frecuencia angular ω , y $G(\omega)$ es la transformada de Fourier de $g(t)$.

4. IMPLEMENTACIÓN NUMÉRICA

En [14], Paul Wilcox propone una técnica para resolver la ecuación fundamental para la compensación de la dispersión. Esta técnica consiste en modificar la ecuación 3.3 de tal manera que se pueda utilizar la transformada inversa rápida de Fourier (IFFT) para la integración numérica. En esta sección se describen los aspectos claves de esta técnica rápida de procesamiento para la compensación de la dispersión [14].

Sea la traza en tiempo recibida $g(t)$, con m puntos y periodo de muestreo Δt . Sea $h(x)$ la traza de distancia compensada de la dispersión, con n puntos y periodo espacial de muestreo Δx . Como la traza de salida está en espacio, la transformada inversa de Fourier debería realizarse del dominio de número de onda k al dominio de espacio. Por esta razón la variable de integración debe ser cambiada de ω a k , la relación entre estas dos variables está dada por:

$$d\omega = v_{gr}(\omega)dk \quad (4.1)$$

$$\omega = v_{ph}(\omega)k$$

Donde $v_{gr}(\omega)$ y $v_{ph}(\omega)$ son la velocidad de grupo y de fase del modo de onda, respectivamente. Realizando el cambio de variable, la ecuación 3.3 resulta en:

$$h(x) = \int_{-\infty}^{\infty} H(k)e^{-jk(\omega)x} dk \quad (4.2)$$

Donde

$$H(k) = G(\omega)v_{gr}(\omega) \quad (4.3)$$

$$\omega = \omega(k)$$

La ecuación 4.2 ya tiene la forma de una transformada inversa de fourier para $H(k)$. Para realizar esta integración se necesita valores de $H(k)$ en puntos igualmente espaciados de la variable de integración. Como se trabaja con medios dispersivos, los puntos igualmente espaciados en ω no corresponden a puntos igualmente espaciados en k , por esta razón, es necesario realizar una interpolación de $G(\omega)$ usando las relaciones de dispersión para encontrar estos valores igualmente espaciados en k .

Con el de no afectar la fase de $G(k)$ al interpolar, se necesita garantizar que el delta de frecuencia en $G(\omega)$ sea pequeña comparada con la tasa con que esta cambia; esto se consigue rellenando de ceros la señal de entrada antes de realizar la transformada rápida de Fourier. Wilcox [14] considera rellenar de ceros, hasta ocho veces el número de puntos de la señal de entrada para obtener una señal a ruido de interpolación de 70 a 80 dB.

Para establecer el tamaño de paso Δk se tiene la restricción de que la longitud de la traza compensada ($n\Delta x$), debería ser más grande que la longitud de la traza de tiempo $m\Delta t$ multiplicada por la velocidad de grupo máxima del modo v_{max} , esta restricción conlleva a establecer el paso del número de onda en:

$$\Delta k = \frac{1}{n\Delta x} \quad (4.4)$$

$$\Delta k = \frac{1}{m\Delta t v_{max}}$$

El valor de paso de espacio Δx se obtiene utilizando la restricción de que el número de onda de Nyquist k_{Nyq} debería ser más grande o igual que el número de onda del modo de onda guiado a la frecuencia de Nyquist f_{Nyq} de la señal de entrada:

$$k_{Nyq} \geq k(f_{Nyq})$$

$$\frac{1}{2\Delta x} \geq k\left(\frac{1}{2\Delta t}\right) \quad (4.5)$$

$$\Delta x \leq \frac{1}{2k\left(\frac{1}{2\Delta t}\right)}$$

Finalmente, con los dos límites de las ecuaciones 4.4 y 4.5 se obtiene el número de puntos en el dominio espacio:

$$n > 2 \frac{k_{Nyq}}{\Delta k} \quad (4.6)$$

Teniendo en cuenta las reglas anteriores, el desarrollo del programa se realizó con el software MATLAB y es de mi total autoría. Siguiendo a [14], el resumen de los pasos para la aplicación del algoritmo son:

- Rellenar la señal recibida $g(t)$ de ceros al menos ocho veces el tamaño de la señal y debe cumplirse que sea una potencia de dos.
- Realizar la FFT de la señal obtenida en el paso anterior para obtener $G(\omega)$. Calcular el valor de n ; x y k siguiendo las reglas 4.4, 4.5 y 4.6.
- Interpolar $G(\omega)$ para encontrar los valores de $G(k)$ a puntos igualmente espaciados en k .

- Calcular $v_{gr}(k)$.
- Computar $H(k) = v_{gr}(k)G(k)$
- Realizar la IFFT de $H(k)$ para obtener $h(x)$.

5. RESULTADOS NUMÉRICOS

A continuación se presentan los resultados numéricos del trabajo. La primera sección presenta la metodología seguida en cada una de las pruebas. La segunda sección presenta los resultados de la evaluación estadística realizada.

Para la implementación del algoritmo se utilizó un como software de desarrollo el paquete básico de MATLAB. La simulación de las ondas de Lamb se realizó mediante el software WaveFormRevealer.

5.1 METODOLOGIA

El objetivo del procedimiento realizado en cada una de las pruebas consistió en evaluar el desempeño del algoritmo en cuanto a resultados obtenidos de la señal dispersa frente a cambios de material, distancia de propagación de las ondas de Lamb y espesor de la placa. El trabajo se realizó con señales sintéticas pero con la intención de que a futuro pueda ser implementado en un sistema real de inspección. Para la evaluación, se simularon ondas de Lamb en cuatro escenarios diferentes.

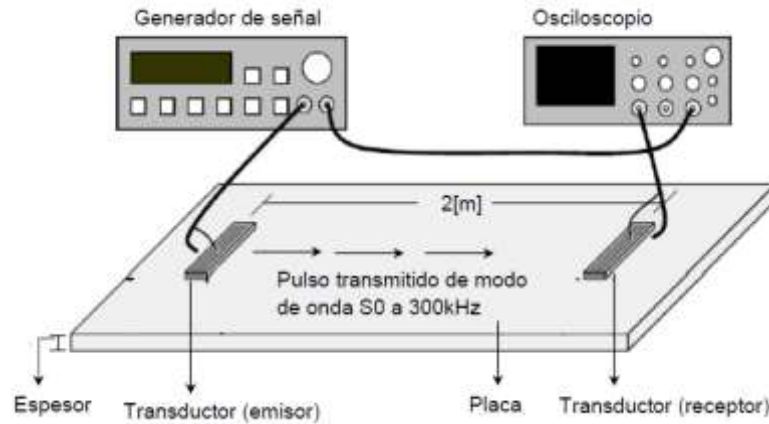
- Escenario 1: Se simuló la propagación de ondas de Lamb en una placa de acero de 5mm de espesor, variando la distancia de propagación de 25cm a 2m. La configuración del sistema emisión-recepción solo excita y detecta el modo S0.
- Escenario 2: Se simuló la propagación de ondas de Lamb en una placa de Aluminio de 5mm de espesor, variando la distancia de propagación de 25cm a 2m. La configuración del sistema emisión-recepción solo excita y detecta el modo S0.

- Escenario 3: Se simuló la propagación de ondas de Lamb en una placa de titanio de 5mm de espesor, variando la distancia de propagación de 25cm a 2m. La configuración del sistema emisión-recepción solo excita y detecta el modo S0.
- Escenario 4: El objetivo de las pruebas de este escenario es evaluar el comportamiento del algoritmo frente a cambios de espesor en una placa. Se simuló la propagación de ondas de Lamb en una placa de aluminio, se fijó una distancia de propagación de las ondas de 50cm y se varió el espesor de la placa de 1mm a 6mm en pasos de 1mm. La configuración del sistema emisión-recepción solo excita y detecta el modo S0.

El Sistema simulado se puede observar en la Figura 8 y las propiedades de las placas se presentan en la Tabla 1. El procedimiento realizado en cada una de las pruebas realizadas en cada escenario es el siguiente:

1. Mediante el software WaveFormRevealer se calcularon las curvas de dispersión de la placa.
2. Como el objetivo es evaluar el desempeño del algoritmo de compensación de la dispersión, se seleccionó una frecuencia de operación en la que se presentaba dispersión.
3. Se creó una señal de excitación tipo toneburts de 5 ciclos de frecuencia central igual a la frecuencia de operación seleccionada en el paso anterior.
4. Mediante el software WaveFormRevealer se obtuvo la señal $g(t)$, esta corresponde a la simulación de la propagación de ondas de Lamb en una placa bajo las condiciones expuestas en cada escenario.
5. Mediante Matlab se aplicó el código desarrollado del algoritmo de compensación de la dispersión a la señal $g(t)$ obtenida en el paso anterior.

Figura 8: Diagrama esquemático de la placa (sistema simulado). Tomado de [17]



5.2 RESULTADOS

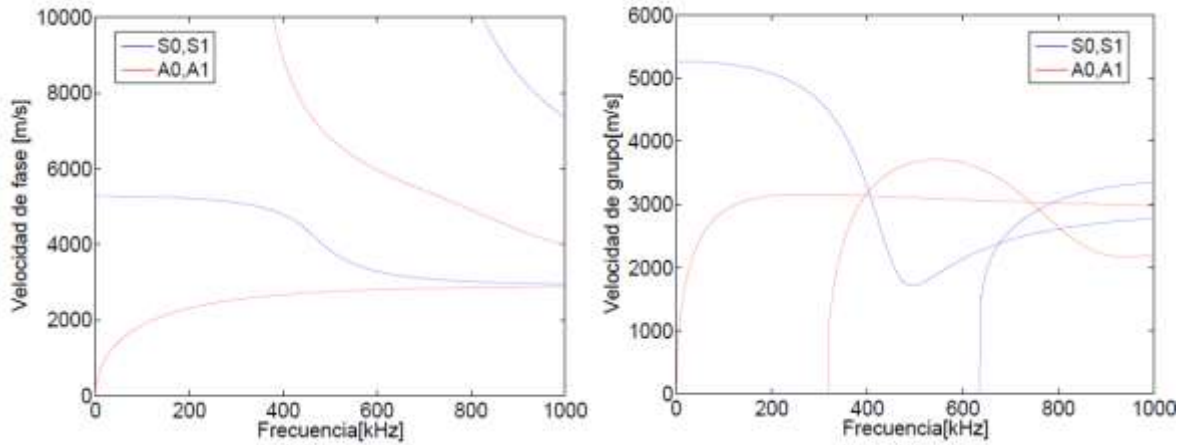
En esta sección se presentan los resultados generales de todos los experimentos realizados. Sin embargo, como el procedimiento seguido es el mismo todos los escenarios, solo se describe en detalle el procedimiento para el experimento de una placa de acero de 5mm de espesor y una distancia de propagación de 2m bajo las condiciones del escenario 1.

5.2.1 Curvas de dispersión. En la Figura 9 se presentan las curvas de dispersión de una placa de acero de 5mm de espesor calculadas mediante el software WaveFormRevealer. Las propiedades de la placa se pueden observar en la Tabla 1.

Tabla 1: Propiedades elásticas de las placas utilizadas.

	Placa 1	Placa 2	Placa 3
Material	Acero	Aluminio	Titanio
Densidad [K_g/m^2]	7850	2700	4510
Coefficiente de Poisson	0.29	0.33	0.3
Módulo de Young [G_{pa}]	200	69	115

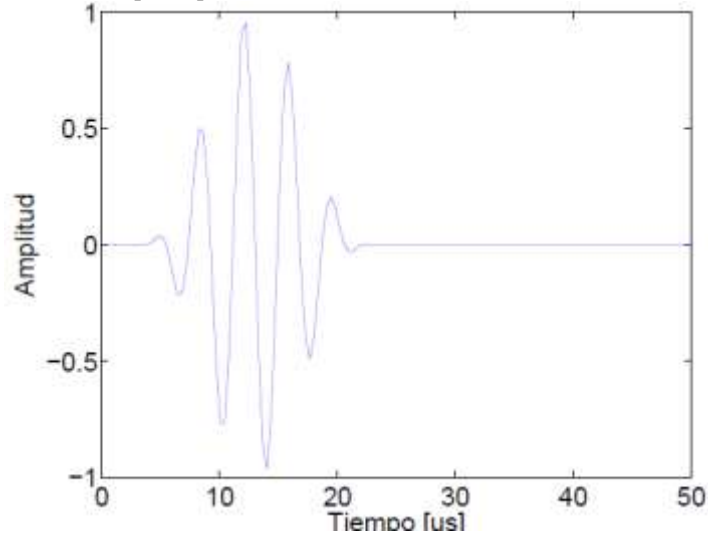
Figura 9: Curvas de dispersión de una placa de acero de 5mm de espesor.



5.2.2 Señal de excitación y frecuencia de operación. En las curvas de dispersión de la Figura 9 se puede observar que a frecuencias inferiores a 300 [kHz] solo existen dos modos de propagación de las ondas de Lamb A0 y S0. Además, se observa que en el rango de frecuencias de 200 [kHz] a 400 [kHz] el modo S0 es más dispersivo que el modo A0, es decir, que el modo A0 mantiene una velocidad de grupo casi constante mientras que para el modo S0 la velocidad de grupo cambia drásticamente con la frecuencia. Se seleccionó una frecuencia de 265 [kHz] con el fin de evitar posibles infiltraciones de modos no deseados.

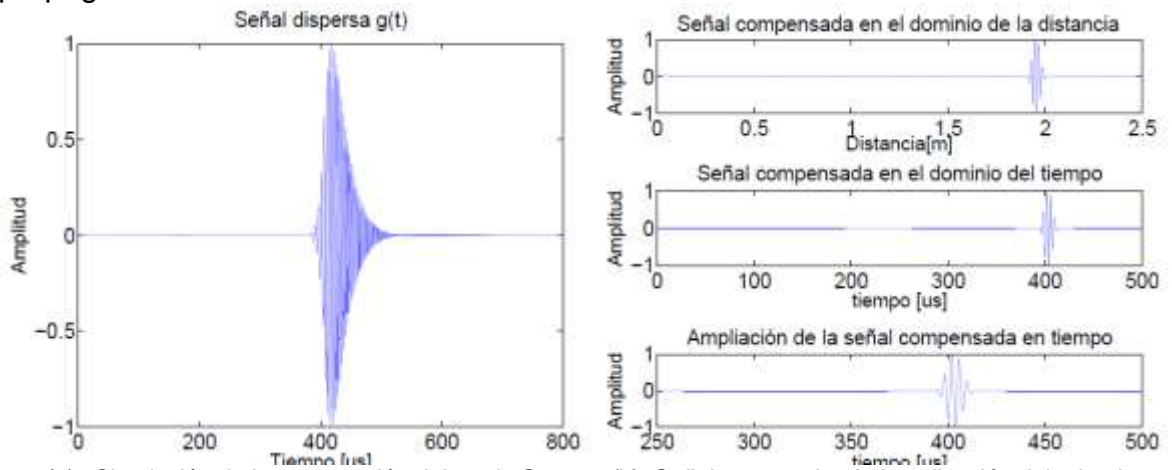
La señal de excitación utilizada en las pruebas es una tipo toneburts de 5 ciclos con ventana hanning (Figura 10), esta señal permite estrechar el ancho de banda y localizar la mayor cantidad de energía en la frecuencia de operación suprimiendo las frecuencias no deseadas.

Figura 10: Señal de excitación tonebursts de 5 ciclos con ventana Hanning y frecuencia central de 265[kHz] .



5.2.3 Señal dispersa y señal compensada. A continuación se presentan los resultados de la simulación de la señal dispersa y la señal que resulta de la aplicación del algoritmo para el quinto experimento del escenario 1.

Figura 11: Resultados de la señal dispersa y la señal compensada para una placa de acero de 5mm de espesor con excitación del modo S0 y una distancia de propagación de 2m.



(a) Simulación de la propagación del modo S0.

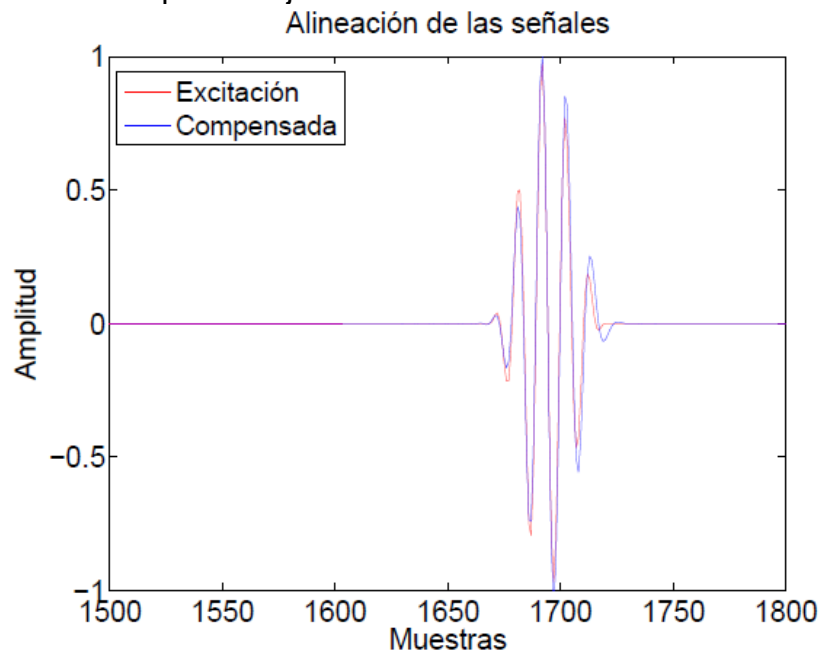
(b) Señal que resulta de la aplicación del algoritmo.

Analizando de forma visual las gráficas de la Figura 11, se observa que en caso de excitación de un solo modo de propagación específicamente el modo S0, el algoritmo de compensación permite eliminar el efecto dispersivo de las ondas recuperando la forma de la señal de excitación.

5.2.4 Correlación, señal de error y norma L2.

La señal de error resulta de la diferencia entre la señal compensada y la señal de excitación. Sin embargo, como la señal compensada está desfasada respecto a la de excitación es necesario primero alinear las dos señales. Para ello se utilizó el método de correlación cruzada, el cual permite encontrar el desfase entre dos señales. Así, el máximo valor del coeficiente de correlación cruzada indica el desfase entre las dos señales (Figura 12). Además, se utilizó la norma L2 como métrica para poder estimar cómo se comporta la dispersión y poder realizar una comparación entre las señales. Se calculó la norma L2 de la señal de excitación a la señal compensada y la señal de error.

Figura 12: Alineación de las señal de excitación y señal compensada para una placa de acero de 5mm de espesor bajo las condiciones del escenario 1.



El procedimiento que se acaba de describir se realizó para cada una de las pruebas realizadas en cada escenario. Los resultados generales se presentan como anexos en las tablas 3 y 4.

5.3 EVALUACIÓN ESTADÍSTICA

El algoritmo de compensación de la dispersión hace uso de las características de dispersión de un medio material para comprimir una señal dispersa a la forma de la señal de excitación. La idea es evaluar el comportamiento del algoritmo frente a cambios de material, distancia de propagación de las ondas y espesor de la placa. Para esto se realiza la siguiente prueba de hipótesis:

5.3.1 Prueba de hipótesis. Se quiere demostrar que la media de los coeficientes de correlación entre las dos señales es mayor a 0.95. Entendiéndose que una alta correlación indica un alto grado de similitud entre las dos señales. Con las pruebas realizadas se quiere validar que el algoritmo de compensación de la dispersión tiene un buen desempeño eliminando la dispersión de la señal recibida.

5.4 Hipótesis nula: $H_0 = X_c \leq 0.95$

5.5 Hipótesis alternativa: $H_1 = X_c \geq 0,95$

Donde X_c es la media de los coeficientes de correlación.

Para la validación de la hipótesis se calcularon los coeficientes de correlación (Tabla 3) y se realizó la prueba estadística t-test con un nivel de significancia de 0.01. Los resultados se presentan en la Tabla 2.

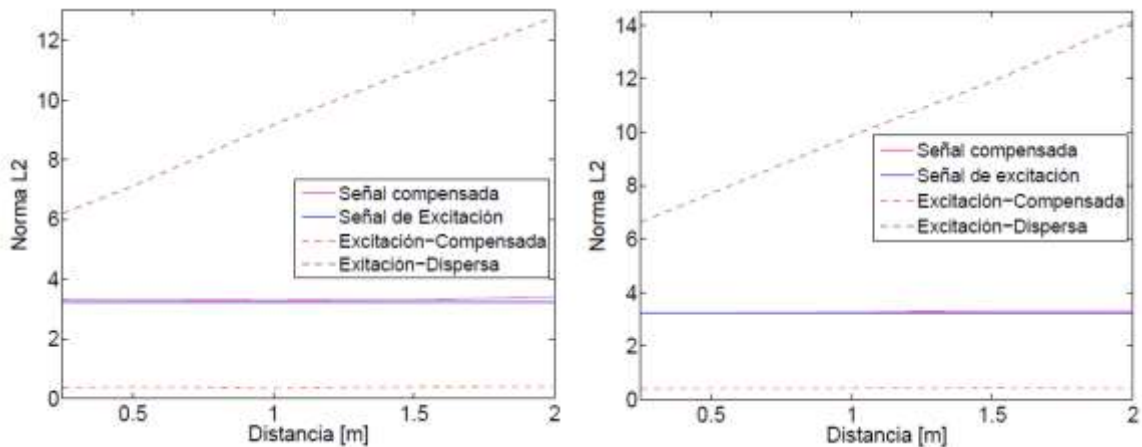
Tabla 2: Resultados de las pruebas estadísticas.

Prueba estadística	P-valor	Nivel de significancia	Intervalo de confianza
T-test prueba de hipótesis	$6.2955e^{-11}$	0.01	0.9658 - 1

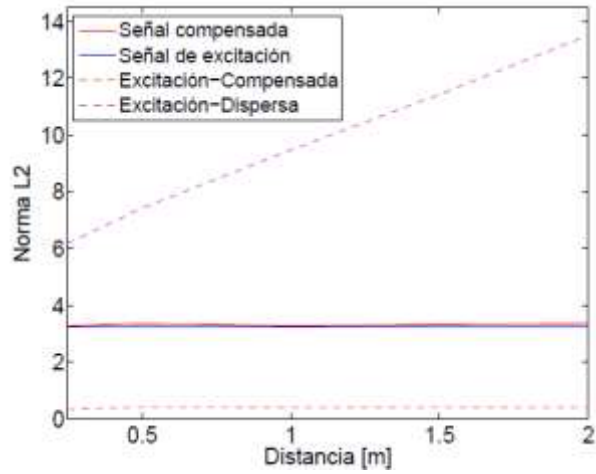
Una vez evaluada la hipótesis de la correlación entre la señal de excitación y señal la compensada, y analizados los resultados se puede determinar que la hipótesis nula se rechaza pues el nivel de significancia 0,01 es mayor al Pvalor de $6.2955e^{-11}$, lo cual indica que para el 99% de la utilización del algoritmo, la correlación entre las dos señales será mayor al 95% demostrando de esta manera la eficacia en la implementación de esta herramienta [24].

5.3.2 Comparación de la señales usando la norma L2. Con el objetivo de estimar el comportamiento de la dispersión y del algoritmo de compensación frente a cambios de material, distancia de propagación de las ondas y espesor de la placa, se utilizó la norma L2 como métrica. Comparando el valor de la norma de las señales se evaluó el desempeño del algoritmo.

Figura 13: Gráficas de Norma L2 Vs Distancia de propagación.

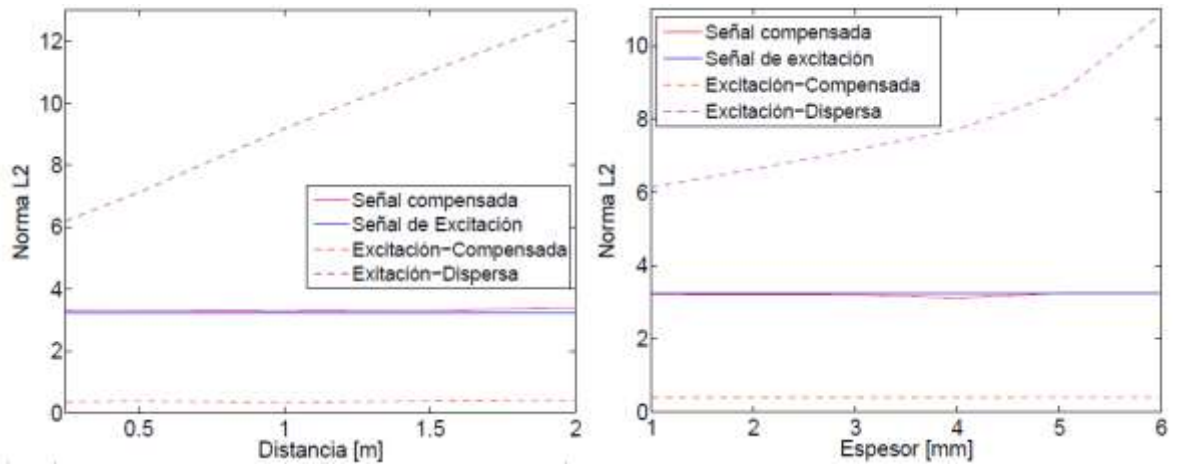


(a) Placa de acero señales del escenario 1. (b) Placa de acero señales del escenario 2.



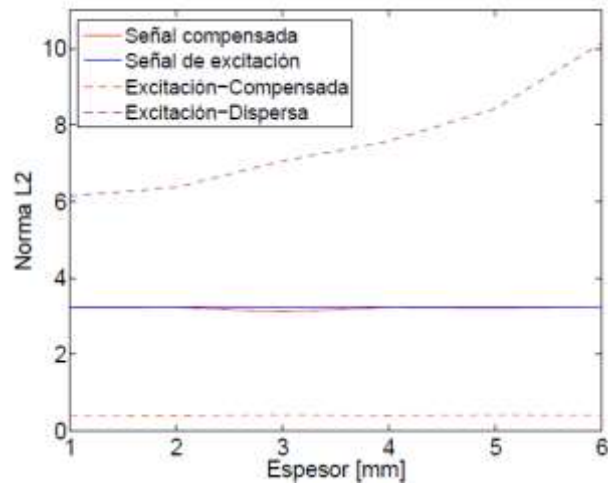
(c) Placa de acero señales del escenario 3.

Figura 14: Gráficas de Norma L2 Vs Espesor de las placas.



(a) Placa de titanio señales del escenario 4.

(b) Placa de titanio señales del escenario 4



(a) Placa de titanio señales del escenario 6.

La tabla 4 y las gráficas de las figura 13 evidencian como el valor de la norma L2 de la señal dispersa aumenta con la distancia de propagación, describiendo adecuadamente lo establecido en la teoría, a mayor distancia de propagación mayor dispersión. Además, se observa como el valor de la norma L2 para las señales compensadas se mantiene casi constante y es muy cercano al de la señal de excitación. Esto demuestra que el algoritmo es independiente a la distancia y puede ser aplicado a señales que se han propagado en un rango de distancias de 25cm a 2m.

Por otro lado en las gráficas de la Figura 14 se observa el comportamiento de la dispersión y del algoritmo frente a cambios en el espesor de la placa. Se evidencia que la dispersión aumenta a medida que aumenta el espesor de la placa. Además se observa como el valor de la norma L2 para las señales compensadas se mantiene casi constante y es muy cercano al de la señal de excitación demostrando que el algoritmo no se ve influenciado frente a cambios en el espesor de las placas.

Para complementar el estudio de evaluación se calcularon los tiempos de ejecución del algoritmo utilizando un computador con procesador Intel Core(TM) i5-2410M, CPU 2.30GHZ y memoria RAM de 4GB, los resultados arrojaron un promedio de 0,6255 segundos demostrando que la implementación del algoritmo es una herramienta que permite solucionar de forma rápida el problema de la dispersión de ondas guiadas Lamb.

6 DISCUSIÓN

Con la realización de este trabajo se aporta a los grupos de investigación en la línea de ensayos no destructivos de la Universidad Industrial de Santander una herramienta útil para eliminar el efecto de la dispersión en ondas de Lamb. Sin embargo, debido a que el estudio realizado solo utiliza señales sintéticas se propone como trabajo futuro la implementación del algoritmo en un sistema real de inspección.

Para aplicaciones en la industria petrolera se propone realizar un estudio de la aplicación del algoritmo para estudiar la viabilidad de su aplicación en un sistema de inspección con ondas guiadas de Lamb en oleoductos.

7 CONCLUSIONES

De este trabajo se puede concluir que la metodología fue pertinente por que conllevó a hacer un análisis del problema de la dispersión en la propagación de ondas guiadas Lamb; la simulación del sistema permitió evaluar el desempeño del algoritmo incluyendo variables relevantes para los procesos de inspección de placas como lo son el material, el espesor y la distancia a inspeccionar de la estructura.

El algoritmo de compensación de la dispersión permite reducir el problema de la dispersión teniendo en cuenta que al implementar el algoritmo propuesto se obtiene que:

- Es verosímil que la correlación entre la señal de excitación y la señal que resulta de la aplicación del algoritmo será superior a 0.95 con un nivel de significancia de 0,01 y un Pvalor de $6.2955e^{-11}$.
- Es verosímil que un aumento en la distancia de propagación o en el espesor de la placa conlleva a un aumento de la dispersión de las señal recibida (dispersa). Sin embargo, no influye en el desempeño del algoritmo dado que el valor de la norma L2 de las señales compensadas se mantiene casi constante.

Una vez realizado el estudio se establece que con un 99% de probabilidad el algoritmo de compensación de la dispersión arroja resultados favorables y con esto se aporta a los grupos de investigación de la Universidad Industrial de Santander una herramienta útil para solucionar el problema de la dispersión de las ondas de Lamb sin incurrir en implementaciones costosas de hardware y con tiempos de ejecución inferiores a 1 segundo.

REFERENCIAS

- [1] DOMÍNGUEZ, Javier. Simulación de la propagación ultrasónica en piezas metálicas para su aplicación en la detección de defectos, 2013.
- [2] KUNDU, Tribikram; GHOSH, Tathagata. Efficient use of Lamb modes for detecting defects in large plates: *Ultrasonics*, vol. 36, no 7, p. 791-801
- [3] QU, Wenzhong, et al. Lamb wave damage detection using time reversal DORT method. *Smart Materials and Structures*, 2013, vol. 22, no 4, p. 045014.
- [4] LI, Fucui; MENG, Gaofen. Dispersion analysis of Lamb waves and damage detection for aluminum structures using ridge in the time-scale domain. *Measurement Science and Technology*, 2009, vol. 20, no 9, p. 095704.
- [5] WILCOX, Paul; LOWE, Mark. signal processing technique to remove the effect of dispersion from guided wave signals. En *REVIEW OF PROGRESS IN QUANTITATIVE NONDESTRUCTIVE EVALUATION*. 2001 Volume 20, p. 555-562
- [6] Lamb, Horacio. On waves in an elastic plate. *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. Vol. 93, no. 648, pp. 114-128.
- [7] STRUTT, John; RAYLEIGH, Baron. The theory of sound. 1945. vol. 1.
- [8] WORLTON, D. Experimental confirmation of Lamb waves at megacycle frequencies. *Journal of Applied Physics*. 1961, vol. 32, no 6, p. 967-971.
- [9] DEMER, L.J.; FENTNOR, L. H. Lamb wave techniques in nondestructive testing(Lamb waves behavior applied to defect evaluation in nondestructive tests of solid elongated cylindrical objects). *International Journal of Nondestructive Testing*, 1969, vol. 1, p. 251-283.

- [10] LOWE, M. J. S.; CAWLEY, P. The applicability of plate wave techniques for the inspection of adhesive and diffusion bonded joints. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 1994, vol. 13, no 4, p. 185-200.
- [11] ROSE, Joseph L. Recent advances in guided wave NDE. En *Ultrasonics Symposium, 1995. Proceedings., IEEE*. 1995. p. 761-770.
- [12] WILCOX, Paul D. *Lamb wave inspection of large structures using permanently attached transducers*. 1998. Tesis Doctoral. Imperial College London (University of London)
- [13] WILCOX, Paul D.; LOWE, M.; CAWLEY, P. The effect of dispersion on long-range inspection using ultrasonic guided waves. *NDT & E International*. 2001, vol. 34, no 1, p. 1-9.
- [14] WILCOX, Paul D. A rapid signal processing technique to remove the effect of dispersion from guided wave signals. *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*. 2003, vol. 50, no 4, p. 419-427.
- [15] GIURGIUTIU, Victor; BAO, Jingjing; ZHAO, Wei. Piezoelectric wafer active sensor embedded ultrasonics in beams and plates. *Experimental mechanics*. 2003, vol. 43, no 4, p. 428-449
- [16] LIU, Weiping; GIURGIUTIU, Victor. Finite element modeling and simulation of piezoelectric wafer active sensors interaction with the host structure for structural health monitoring. En *Smart Structures and Materials*. International Society for Optics and Photonics. 2006. p. 61742Z-61742Z-12.
- [17] LIU, Weiping; GIURGIUTIU, Victor. Finite element modeling and simulation of piezoelectric wafer active sensors interaction with the host structure for

structural health monitoring. En *Smart Structures and Materials*. International Society for Optics and Photonics. 2006. p. 61742Z-61742Z-12.

- [18] RODRÍGUEZ, Cristina, et al. Sistema automatizado de detección de defectos en piezas metálicas mediante ensayos no destructivos con ultrasonidos. 2012.
- [19] DA SILVA, Bruno. *AVALIAÇÃO DE FALHAS EM REVESTIMENTOS ANTICORROSIVOS PELO MÉTODO DE ENSAIO NÃO-DESTRUTIVO POR ULTRA-SOM*. 2011. Tesis Doctoral. Universidade Federal do Rio de Janeiro
- [20] WILCOX, Paul D.; LOWE, M.; CAWLEY, P. Lamb and SH wave transducer arrays for the inspection of large areas of thick plates. En *REVIEW OF PROGRESS IN QUANTITATIVE NONDESTRUCTIVE EVALUATION*: AIP Publishing, 2000. Vol19. p. 1049-1056..
- [21] GUO, Dongshan; KUNDU, Tribikram. A new transducer holder mechanism for pipe inspection. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2001, vol. 110, no 1, p. 303-309
- [22] ALLEYNE, David. N. Rapid, long range inspection of chemical plant pipework using guided waves. En *REVIEW OF PROGRESS IN QUANTITATIVE NONDESTRUCTIVE EVALUATION*: AIP Publishing, 2001. vol 20..p. 180-187.
- [23] ALLEYNE, David N.; CAWLEY, Peter. Optimization of Lamb wave inspection techniques. *Ndt & E International*, 1992, vol. 25, no 1, p. 11-22.
- [24] NEWBOLD, Paul. Estadística para los negocios y la economía. Prentice Hall. 1997. vol 4.

BIBLIOGRAFÍA

WILCOX, Paul D.; LOWE, M.; CAWLEY, P. The effect of dispersion on long-range inspection using ultrasonic guided waves. *NDT & E International*. 2001, vol. 34, no 1, p. 1-9.

WILCOX, Paul D. A rapid signal processing technique to remove the effect of dispersion from guided wave signals. *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*. 2003, vol. 50, no 4, p. 419-427.

NEWBOLD, Paul. Estadística para los negocios y la economía. Prentice Hall. 1997. vol 4.

ANEXOS

ANEXO: A. Tabla de resultados de los coeficientes de correlación variando la distancia de propagación.

Escenario	Material	Espesor [mm]	Distancia [m]	Coef. Corr. Dispersión	Coef. Corr. Compensada
1	Acero	5	0.25	0.4173	0.9909
			0.5	0.2915	0.9894
			1	0.1907	0.9915
			1.5	0.01097	0.9805
			2	0.0109	0.9799
2	Aluminio	5	0.25	0.4036	0.9784
			0.5	0.2173	0.9761
			1	0.1897	0.9515
			1.5	0.0136	0.9580
			2	0.0790	0.9749
3	Titanio	5	0.25	0.4198	0.9900
			0.5	0.2314	0.9530
			1	0.2201	0.9866
			1.5	0.0350	0.9520
			2	0.0132	0.9870

ANEXO: B. Tabla de resultados de los coeficientes de correlación variando el espesor de las placas.

Escenario	Material	Espesor	Distancia	Norma L2	Norma L2
------------------	-----------------	----------------	------------------	-----------------	-----------------

		[mm]	[m]	Error Disp	Error Comp
4	Acero	1	0.5	0.5712	0.9727
		2		0.5162	0.9685
		3		0.4874	0.9610
		4		0.3912	0.9702
		5		0.2915	0.9894
		6		0.1407	0.9613
5	Aluminio	1	0.5	0.4501	0.9800
		2		0.4057	0.9730
		3		0.3594	0.9694
		4		0.3015	0.9685
		5		0.2173	0.9580
		6		0.1130	0.9530
6	Titanio	1	0.5	0.4592	0.9732
		2		0.3895	0.9799
		3		0.3352	0.9501
		4		0.2875	0.9750
		5		0.2314	0.9530
		6		0.1358	0.9613

ANEXO: C. Tabla de resultados de la norma L2 de la señal dispersa y la señal compensada variando la distancia de propagación.

Escenario	Material	Espesor [mm]	Distancia [m]	Norma L2 Dispersa	Norma L2 Compensada
1	Acero	5	0.25	6.2862	3.3286
			0.5	7.0254	3.3059
			1	8.8635	3.2893
			1.5	10.6147	3.3156
			2	12.1640	3.3824
2	Aluminio	5	0.25	6.5018	3.2426
			0.5	7.6030	3.2415
			1	10.0827	3.2595
			1.5	12.1880	3.2995
			2	14.0162	3.3087
3	Titanio	5	0.25	6.3581	3.2780
			0.5	7.1589	3.3592
			1	9.1704	3.2790
			1.5	11.0116	3.3110
			2	12.6259	0.3620

ANEXO D: Tabla de resultados de la Norma L2 para las señales de error en cada una de las pruebas variando el espesor de las placas.

Escenario	Material	Espesor [mm]	Distancia [m]	Norma L2 Dispersa	Norma L2 Compensada
4	Acero	1	0.5	5.9845	3.2001
		2		5.9899	3.2119
		3		6.0151	3.1998
		4		6.2240	3.2501
		5		7.0254	3.3059
		6		8.8858	3.2515
5	Aluminio	1	0.5	5.9846	3.2111
		2		5.9914	3.2127
		3		6.0139	3.2027
		4		6.3099	3.1110
		5		7.6039	3.2410
		6		9.9034	3.2415
6	Titanio	1	0.5	5.9847	3.2637
		2		5.9885	3.2595
		3		6.0164	3.3601
		4		6.1929	3.2990
		5		7.1589	3.3592
		6		9.1054	3.3073

ANEXO E: Tabla de resultados de la Norma L2 para las señales de error en cada una de las pruebas variando la distancia de propagación

Escenario	Material	Espesor [mm]	Distancia [m]	Norma L2 Error Disp	Norma L2 Error Comp
1	Acero	5	0.25	6.1021	0.3502
			0.5	8.3171	0.3832
			1	9.1752	0.3384
			1.5	11.1291	0.3842
			2	12.0863	0.3998
2	Aluminio	5	0.25	6.2931	0.4064
			0.5	8.7010	0.4130
			1	9.8635	0.4210
			1.5	11.8951	0.4113
			2	14.1570	0.4298
3	Titanio	5	0.25	86.1865	0.3997
			0.5	8.4309	0.4111
			1	9.6729	0.4010
			1.5	11.4319	0.4090
			2	13.5149	0.4001

ANEXO F: Tabla de resultados de la Norma L2 para las señales de error en cada una de las pruebas variando el espesor de las placas.

Escenario	Material	Espesor [mm]	Distancia [m]	Norma L2 Error Disp	Norma L2 Error Comp
4	Acero	1	0.5	6.1317	0.3870
		2		6.5729	0.3910
		3		7.2397	0.3991
		4		7.4837	0.3899
		5		8.3171	0.3832
		6		9.9629	0.3973
5	Aluminio	1	0.5	6.1328	0.3880
		2		6.6275	0.3850
		3		7.1603	0.3895
		4		7.7178	0.3900
		5		8.7010	0.3925
		6		10.8729	0.3950
6	Titanio	1	0.5	6.1423	0.3963
		2		6.3729	0.3890
		3		7.3634	0.4123
		4		7.4846	0.3918
		5		8.4309	0.4111
		6		10.1470	0.3998