



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

Imágenes Ultrasónicas de Materiales Multicapas

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
FÍSICO

P R E S E N T A :

ALEJANDRO VILLARREAL LÓPEZ



TUTOR(A)
DRA. LUCÍA MEDINA GÓMEZ

2008



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

FACULTAD DE CIENCIAS

División de Estudios Profesionales



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

ACT. MAURICIO AGUILAR GONZÁLEZ
Jefe de la División de Estudios Profesionales
Facultad de Ciencias
Presente.

Por este medio hacemos de su conocimiento que hemos revisado el trabajo escrito titulado:

"Imágenes Ultrasonicas de Materiales Multicapas"

realizado por **Villarreal López Alejandro**, con número de cuenta **099548120**, quien opta por titularse en la opción de **Tesis** en la licenciatura en **Física**. Dicho trabajo cuenta con nuestro voto aprobatorio.

Propietario Dr. Ricardo Ruíz Boullosa

Propietario Dr. Guillermo Monsivais Galindo

Tutor(a)
Propietario Dra. Lucía Medina Gómez

Suplente Dr. Marcos Ley Koo

Suplente Dr. Arturo Olvera Chávez

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Ciudad Universitaria, D.F., a 6 de diciembre del 2007.
**LA COORDINADORA DEL COMITÉ DE TITULACIÓN
DE LA LICENCIATURA EN FÍSICA**

M. EN C. ALICIA ZARZOSA PÉREZ

FACULTAD DE CIENCIAS
DEPARTAMENTO DE FÍSICA

Señor sinodal: antes de firmar este documento, solicite al estudiante que le muestre la versión digital de su trabajo y verifique que la misma incluya todas las observaciones y correcciones que usted hizo sobre el mismo.

1 Agradecimientos

Quiero agradecer antes que nada a la Facultad de Ciencias, U.N.A.M. por la oportunidad que me otorgo para mi superación académica y personal, especialmente a mis profesores y amigos sin los cuales hubiera sido imposible concluir esta fase de mi vida.

A mi directora de Tesis Dra. Lucia Medina Gómez, a quien le guardo un especial cariño y respeto, gracias por la confianza y el apoyo recibidos.

A mi madre Dra. Lila López Reyes y a mi hermana Ing. Cecilia Villarreal López por brindarme siempre su apoyo moral y comprensión, aun en los momentos mas difíciles de mi carrera profesional.

México D. F., Octubre de 2008

Índice general

1. Introducción	1
2. Ultrasonido	5
2.1. Acústica	5
2.2. ¿Qué es una onda?	6
2.2.1. Ondas mecánicas y ondas armónicas	7
2.2.2. Ondas estacionarias	9
2.2.3. Ondas longitudinales en fluidos	10
2.2.4. Ondas de Rayleigh y Lamb [13]	11
2.2.5. Superposición de ondas	12
2.2.6. Interferencia de dos ondas armónicas de igual amplitud y frecuencia	12
2.3. Ecuación de onda	13
2.3.1. Comportamiento elástico de los fluidos	13
2.3.2. Ecuación de onda plana	16
2.4. Soluciones de la ecuación de onda	18
2.4.1. Ondas armónicas planas	18
2.5. Fenómenos acústicos	19
2.5.1. Resonancia	19
2.5.2. Absorción	19
2.5.3. Atenuación	20
2.5.4. Impedancia acústica	20
2.5.5. Propagación	20
2.5.6. Reflexión, Refracción y Transmisión	21
2.5.7. Difracción	21
2.5.8. Dispersión	21
2.6. Generación de ultrasonido: transductores	22
2.6.1. Efecto Piezoeléctrico	23
2.6.2. Transductores piezoeléctricos	24

2.6.3. Características de transductores piezoeléctricos	25
2.7. Principio de Huygens	28
2.7.1. Campos irradiados de transductores ultrasónicos	29
2.7.2. Zona de Fresnel	31
2.7.3. Zona de Fraunhofer	31
2.7.4. Apertura del haz del transductor	32
2.8. Transformada de Hilbert	33
2.9. Transformada de Fourier	33
3. Ensayos no Destructivos por Ultrasonido	35
3.1. Evaluación No Destructiva	35
3.2. Métodos de END	36
3.3. END por Ultrasonido	37
3.4. Métodos de adquisición para ensayos por ultrasonidos	38
3.5. Formatos de Visualización	40
3.5.1. Presentación A-Scan	40
3.5.2. Presentación B-Scan	41
3.5.3. Presentación C-Scan	42
3.6. Técnicas Digitales para END	42
4. Simulación	44
4.1. Implementación del Algoritmo	49
4.1.1. Procedimientos de la Primera Fase	50
4.1.2. Procedimientos de la Segunda Fase	62
5. Resultados	67
5.1. Capas con distintos grosores	68
5.2. Inhomogeneidades presentes en el material	73
5.3. Análisis	84
6. Conclusiones	91
A. Código	93

Capítulo 1

Introducción

Antes de la Segunda Guerra Mundial, el sonar, la técnica de enviar ondas acústicas a través del agua y de observar los ecos para caracterizar los objetos sumergidos, inspiró a algunos investigadores a buscar maneras de aplicar el ultrasonido en otros campos como son las pruebas ultrasónicas en el área industrial y el diagnóstico médico. En 1929 y 1935, Sokolov estudió el uso de ondas ultrasónicas en la detección de objetos de metal. Mulhauser, en 1931, obtuvo una patente para usar ondas ultrasónicas, usando dos transductores para detectar defectos en sólidos. Firestone (1940) y Simons (1945) desarrollaron la prueba ultrasónica pulsada usando una técnica de pulso-eco.[2]

Paralelamente investigadores en Japón comenzaron a explorar las capacidades de diagnóstico médico del ultrasonido. Los primeros instrumentos ultrasónicos utilizaron una presentación “modo A” con curvas en una pantalla de osciloscopio. Eso fue seguido por una presentación “modo B” con una imagen de dos dimensiones en escala de grises.

El trabajo de Japón en ultrasonido era relativamente desconocido en los Estados Unidos y Europa hasta los años 50. Los investigadores entonces presentaron sus resultados a la comunidad médica internacional sobre el uso del ultrasonido para detectar cálculos biliares, masas en el pecho y tumores[54]. Asimismo, fueron los primeros en utilizar el efecto Doppler para el estudio del flujo sanguíneo[33].

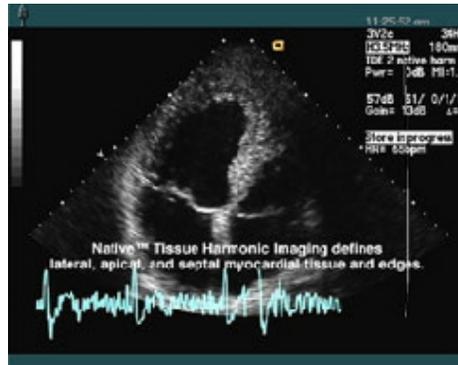


Figura 1.1 Imagen ultrasonica del corazon

Los primeros que trabajaron en los Estados Unidos con el ultrasonido contribuyeron a muchas innovaciones y descubrimientos importantes en el campo durante las décadas siguientes. Los investigadores desarrollaron equipo ultrasónico para efectuar ensayos no destructivos en materiales.

Los Ensayos no Destructivos (END) son técnicas que emplean métodos no invasivos para la detección y localización de discontinuidades y/o defectos en productos, partes, piezas o componentes en servicio, también se utilizan para caracterizar las propiedades mecánicas de las piezas. El campo de aplicación de los END es muy amplio e interdisciplinario que juega un papel crítico en el control de calidad, monitoreo y caracterización de las condiciones de un material como pueden ser defectos, fracturas o fallas en general. Estas pruebas son realizadas de manera que no afectan al material en inspección, por lo que su ventaja principal es que no hay cambios en las propiedades físicas y/o químicas así como en las dimensiones de la parte sujeta a inspección. Los END también permiten realizar control de calidad en los componentes analizados, ya que pueden inspeccionar productos soldados, fundidos, forjados, laminados, etc.; en casi cualquier material, por lo que tienen aplicación en el campo electrónico, siderúrgico, automotriz, metalúrgico, naval, de comunicaciones y transporte entre otros.[1]

Dentro de los END existen varias técnicas empleadas, como son la inspección visual, penetración de líquidos, los ensayos con partículas magnéticas, ensayos elec-

tromagnéticos, rayos X y ultrasonido (END-UT)[45] .

Los END-UT utilizan altas frecuencias acústicas, que utilizando la información que brinda las reflexiones y/o transmisión de la energía a través de un medio permite examinar y realizar mediciones sobre características propias del material, detección y evaluación de posibles fallas y dimensionalización del medio de propagación entre otras.

Un sistema típico de inspección ultrasónico esta conformado por:

- Generador y receptor de pulsos, encargado de producir pulsos eléctricos de alto voltaje.
- Transductor, es el que convierte los pulsos eléctricos en energía ultrasónica y viceversa.
- Despliegue gráfico, muestra los cambios de amplitud que sufre el pulso ultrasónico cuando viaja a través del medio, en una gráfica de voltaje contra tiempo.

El principio físico en que se basa esta técnica es que la energía acústica se propaga en el material a inspeccionar en forma de una onda, que al existir una discontinuidad (medio con características acústicas diferentes al material) parte de la energía se refleja y parte se transmite. La onda reflejada es convertida a pulsos eléctricos por medio del transductor y la información es desplegada gráficamente, a esto se conoce como la técnica pulso-eco. A partir de esta información se puede caracterizar el material de prueba, así como defectos y evaluar la existencia de una inhomogeneidad o falla.[10]

El objetivo del presente trabajo de tesis es: simular imágenes acústicas de materiales multi-capas cuando éstos son radiados empleando la técnica pulso - eco.

Los objetivos particulares engloban lo siguiente:

1. Diseño del programa para hacer la simulación de pruebas ultrasónicas en materiales multi - capas en plataforma Matlab
2. Generación de imágenes ultrasónicas de materiales multicapas con y sin fallas.
3. Validación del algoritmo comparando con datos experimentales.

Este trabajo de tesis está organizado de la siguiente manera: El capítulo 1 da un panorama general de la historia del ultrasonido así como una breve introducción a los (END), también se presentan los objetivos del presente trabajo. El capítulo 2 describe los conceptos, propiedades y características básicas de la acústica. El capítulo 3 introduce las técnicas de ensayos no destructivos haciendo énfasis a las pruebas realizadas con ultrasonido. La discretización del medio de propagación y algoritmo de generación de imágenes se describe en el capítulo 4. Finalmente en los capítulos 5 y 6 se presentan los resultados y las conclusiones del trabajo, respectivamente.

*Además, incluimos un apéndice donde mostramos el código fuente escrito en la plataforma **Matlab 7.4**.*

Capítulo 2

Ultrasonido

2.1. Acústica

Tradicionalmente la acústica es una de las ramas fundamentales de la física. La acústica estudia las distintas interacciones de presiones mecánicas con los sólidos y fluidos, el sonido es esencialmente el paso de las fluctuaciones de presión a través de la materia como el resultado de fuerzas vibratorias. Una onda acústica puede formarse debido a diversas fuentes, por ejemplo, turbulencia en el aire o cualquier otro gas, el paso de un cuerpo a través de un fluido, o el impacto de un sólido contra otro sólido. El sonido tiene los atributos de una onda, así como la luz y las señales de radio. Pero a diferencia de las ondas electromagnéticas, el sonido no viaja en el vacío ya que requiere de un medio de propagación. El sonido puede contener sólo una frecuencia, lo que es conocido como onda monocromática, la cual puede ser representada por un función senoidal Figura 2.1, en donde la abscisa representa el tiempo y la ordenadas representa el desplazamiento de las moléculas del medio o la desviación de la presión o densidad. Cuando el eje de la ordenadas representa la diferencia de presiones, la porción superior de la onda senoidal representa los estados de compresión y las porciones inferiores representan las fases de rarefacción de la propagación.[3]

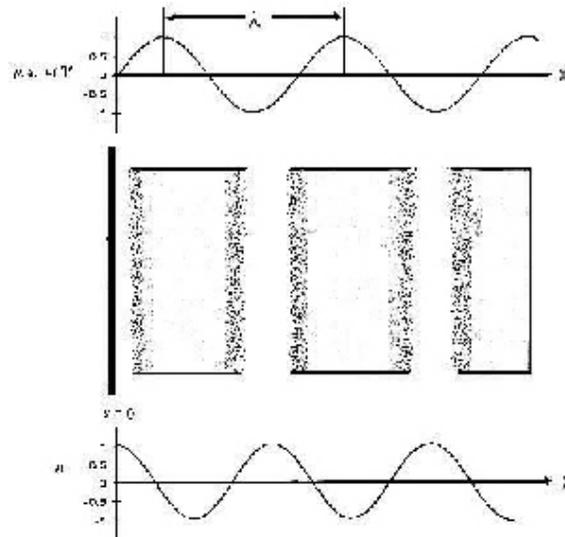


Figura 2.1 compresiones y rarefacciones

2.2. ¿Qué es una onda?

El movimiento ondulatorio es un concepto tan intuitivo que es difícil de definir. Es fácil dar una simple definición de una onda pero es difícil dar una en donde no hayan excepciones o contraejemplos. Una onda es una perturbación de las condiciones iniciales de alguna propiedad de un medio, por ejemplo, densidad, presión, campo eléctrico o campo magnético, que se propaga a través del espacio transportando energía. Frecuentemente la condición inicial es el equilibrio estático. Existen puntos en los que la oscilación resultante es máxima, distantes entre si media longitud de onda, denominada cresta o valle, que se alternan con otros en los que la vibración es nula, denominados nodos. La distancia entre una cresta o valle y un nodo sucesivos es un cuarto de la longitud de onda de las ondas que se superponen

figura 2.2.[50]

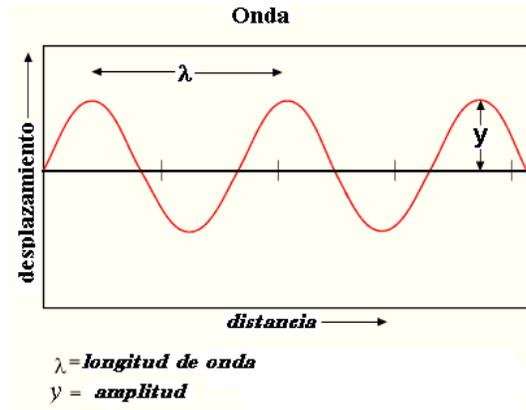


Figura 2.2 Onda senoidal

2.2.1. Ondas mecánicas y ondas armónicas

Si un extremo de un cuerpo perfectamente rígido es golpeado por un martillo, todos los puntos a lo largo del cuerpo sienten el golpe instantáneamente, y el cuerpo se mueve como una unidad. No ha ocurrido un movimiento ondulatorio, sólo una translación de cuerpo rígido, sin embargo ningún cuerpo es perfectamente rígido. La elasticidad del cuerpo provee un medio para que viaje el impulso a una velocidad finita por ende el otro extremo del cuerpo siente el golpe después de un corto retraso [50].

A manera de ejemplo la figura 2.3, muestra varios osciladores acoplados de forma que el movimiento de uno de ellos influye en todos los demás. El efecto neto del acoplamiento de dos o más osciladores se puede describir como un intercambio de energía entre ellos. El movimiento ondulatorio debe su existencia a sistemas vibrantes próximos que son capaces de transmitir su energía unos a otros.

La transferencia de energía entre dos osciladores se debe a que ambos comparten un elemento (rigidez, masa o resistencia). El acoplamiento de resistencia inevitablemente conlleva pérdidas de energía y por lo tanto un rápido decaimiento de la vibración. Sin embargo, el decaimiento vía rigidez o masa no consume potencia, siendo posible la transferencia continua de energía entre muchos osciladores, lo que

constituye la base del movimiento ondulatorio.

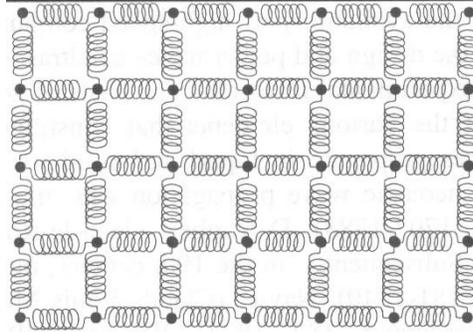


Figura 2.3 Representación bidimensional

Consideremos como ejemplo un sistema mecánico con acoplamiento de rigidez: dos partículas iguales de masa m unidas, cada una de ellas, a un muelle de constante elástica k , en la figura los pequeños círculos representan las masas y los resortes entre ellas representan los muelles.

Cuando el número de masas de nuestro sistema lineal aumenta, éste se aproxima a un sistema unidimensional continuo, ya que no se distingue cada elemento individual. En este sencillo modelo, las partículas del medio están representadas por las masas, mientras que sus propiedades elásticas son representadas por los muelles mostrados en la figura 2.3. Cuando la primera partícula se desvía longitudinalmente de su posición de equilibrio y a continuación se suelta, su movimiento se transmite a la segunda partícula y de ésta a la tercera, y así sucesivamente. El resultado es la propagación de un pulso longitudinal. El movimiento longitudinal de las masas tiene semejanza con el de las partículas de un medio material en el se propaga una onda longitudinal.[16][17]

Aún cuando el problema de muchos cuerpos ($\sim 10^{23}$ partículas) es complicado, el comportamiento del conjunto puede ser descrito tomando en cuenta la Ley de Hooke ($F = ma = -k\Delta x$, donde Δx es la compresión o elongación del resorte); de manera que la partícula desplazada ejecutará un movimiento armónico oscilatorio de frecuencia $\sqrt{k/m}$. Este movimiento se transmitirá a las partículas vecinas produciendo un incremento o decremento local de la densidad, la rapidez con la cual

este cambio local de la densidad ocurre está determinada por la constante elástica k , que involucra a las constantes individuales k_i y la ubicación de las partículas en equilibrio, así como también por la distribución de masa. Conviene mencionar que, ya que las constantes elásticas y las masas individuales no necesariamente son las mismas para todas las partículas, un sólido puede poseer una o varias constantes k_i , lo que determina si es homogéneo o inhomogéneo.

Cuando una cuerda tensa se pulsa (lo que supone una energía adicional) la perturbación resultante se propaga a lo largo de ella. Dicha perturbación consiste en la variación de la forma de la cuerda a partir de su estado de equilibrio: los segmentos de la cuerda se mueven en una dirección perpendicular a la cuerda y por tanto perpendicularmente a la dirección de propagación de la perturbación. Una onda en la que la perturbación es perpendicular a la dirección de propagación se denomina onda transversal. En el caso de que las masas de la figura 2.3, se desplazaran perpendicularmente, el movimiento sería semejante a la propagación de una onda transversal en el medio material. Existen otros casos en que los movimientos de las partículas del medio no son puramente longitudinales o transversales (por ejemplo las ondas superficiales en un líquido).[8]

2.2.2. Ondas estacionarias

Consideremos una onda armónica cualquiera, ϕ_1 , de frecuencia angular ω y número de onda n , que se propaga de izquierda a derecha en la dirección del eje x . La onda incide perpendicularmente en una pared perfectamente reflejante, de forma que da lugar a una onda reflejada, ϕ_2 , que tendrá la misma amplitud, la misma frecuencia angular y el mismo número de onda que la onda incidente, pero que se propagará de derecha a izquierda en la dirección del eje x .

$$\phi_1 = \phi_0 \sin(kx - \omega t) \quad \phi_2 = \phi_0 \sin(kx + \omega t) \quad (2.1)$$

Ambas ondas se superponen dando lugar a lo que se denomina onda estacionaria:

$$\phi = \phi_1 + \phi_2 = \phi_0 [\sin(kx - \omega t) + \sin(kx + \omega t)] = 2\phi_0 \cos(\omega t) \sin(kx) \quad (2.2)$$

La superposición de las dos ondas viajeras de la ecuación 2.1 da lugar a una onda que no es del mismo tipo que las que la provocan.[13]

2.2.3. Ondas longitudinales en fluidos

Las ondas en las que la perturbación es paralela a la dirección de propagación se denominan longitudinales como se mencionó anteriormente. Un ejemplo muy importante lo constituyen las ondas sonoras propagándose en cualquier medio material (sólido, líquido o gaseoso) donde las moléculas del medio oscilan en la dirección de propagación.

Consideremos un fluido (líquido o gas) de densidad ρ y módulo volumétrico de elasticidad B , encerrado en un tubo, en un determinado instante se produce una perturbación en uno de sus extremos por lo que el fluido se desplaza de su posición de equilibrio. Aplicando a una sección del fluido, de espesor dx en el equilibrio, la segunda ley de Newton y las leyes de la elasticidad, se obtiene:

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = \frac{B}{\rho} \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} \quad v = \sqrt{\frac{B}{\rho}} \quad (2.3)$$

En donde ξ es el desplazamiento de dx y v es la velocidad de propagación. La presión en el fluido obedece a la misma ecuación de onda

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = \frac{B}{\rho} \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} \quad v = \sqrt{\frac{B}{\rho}} \quad (2.4)$$

En donde p es la presión y v es la velocidad de propagación en el gas ideal bajo condiciones adiabáticas, la velocidad de propagación de las ondas de presión puede escribirse en función de la temperatura

$$v = \sqrt{\frac{B}{\rho}} = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}} \quad (2.5)$$

donde γ es el índice adiabático del gas, R es la constante de los gases ideales, T la temperatura y M la masa molecular del gas.[10]

2.2.4. Ondas de Rayleigh y Lamb [13]

Si la frontera del plano de un sólido semi-infinito separa el sólido de un medio enrarecido, como es un gas, entonces la propagación de la onda puede ocurrir cerca de la frontera mediante el acoplamiento de ondas longitudinales y transversales en la interfase. Dichas ondas, las cuales fueron descritas originalmente por Rayleigh en 1885, son frecuentemente referidas como *ondas de Rayleigh*. Como se ve en la figura (2.3a), la amplitud del desplazamiento de las partículas de estas ondas decae rápidamente con la distancia desde la interfase y, a una profundidad de dos longitudes de onda Rayleigh (λ_R) la amplitud es prácticamente cero. Cada partícula se mueve en una órbita elíptica cuya dirección de polarización cambia a una profundidad de $0.2 \lambda_R$ con respecto a la interfase.

Otras formas de movimiento ondulatorio pueden ocurrir en placas y cuerdas y, dependiendo de las dimensiones, distintos modos de propagación son posibles. El caso más simple ocurre cuando el espesor y el ancho de la cuerda o la placa son mucho menores que una longitud de onda así que sólo el modo de menor orden es posible. Por ejemplo, si la punta de una cuerda delgada fue excitada con vibraciones axiales de baja frecuencia, se propagará una onda extensional, con movimiento de la partícula a lo largo y perpendicularmente al eje de la cuerda. Como se ilustra en la figura (2.3b), en la superficie libre de la cuerda el componente normal de la fuerza es cero y consecuentemente el componente de fuerza perpendicular en la cuerda también será cero. La onda se propaga sin que ocurra ningún cambio en el volumen asociado a la partícula, aunque por supuesto, su forma cambie. Por otro lado, si el material es una placa de ancho infinito, un movimiento transversal puede ocurrir tanto en el ancho como en el espesor de la placa. Las ondas que resultan de todos los posibles modos, incluyendo el modo de onda extensional, llamadas ondas

de Lamb.[23][49]

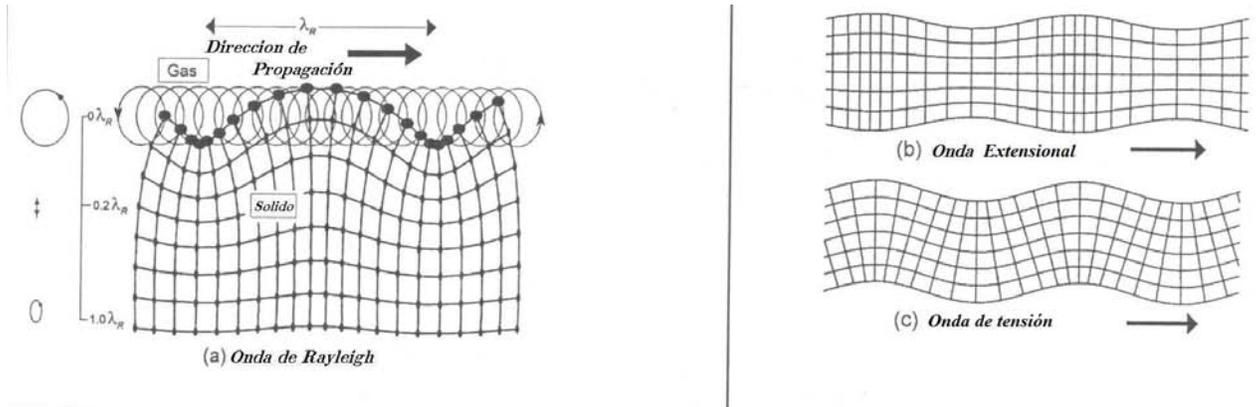


Figura 2.3 Imagen del desplazamiento de una partícula por (a)Ondas de Rayleigh, (b)Onda longitudinal.(Lamb) en una cuerda delgada y (c) Ondas de tensión (antisimétrica) ondas de Lamb en un plano delgado.

2.2.5. Superposición de ondas

Cuando dos ondas se encuentran en un punto o una región del espacio, el resultado es una nueva onda cuya perturbación es la suma de las perturbaciones de las dos ondas originales.[52]

2.2.6. Interferencia de dos ondas armónicas de igual amplitud y frecuencia

Supongamos que superponemos dos ondas armónicas, p_1 y p_2 , de igual amplitud y frecuencia, desfasadas una cantidad δ

$$p_1 = p_0 \sin(kx - \omega t) \quad p_2 = p_0 \sin(kx - \omega t + \delta) \quad (2.6)$$

La superposición de ambas ondas da como resultado una tercera onda armónica, cuya amplitud depende de la diferencia de fase entre las ondas originales

$$p_1 + p_2 = 2p_0 \cos(\delta) \sin(kx - \omega t) \quad (2.7)$$

Si las dos ondas están en fase, la interferencia es constructiva y la amplitud de la onda resultante es la suma de las amplitudes de las ondas primitivas. Si las dos ondas están fuera de fase 90° , la interferencia es destructiva y las ondas se anulan entre sí.[13]

2.3. Ecuación de onda

2.3.1. Comportamiento elástico de los fluidos

El termino *partícula* del medio hace referencia a un elemento de volumen lo suficientemente grande para contener millones de moléculas por lo que se puede pensar como un fluido continuo, suficientemente pequeño como para que las variables acústicas como presión, densidad y velocidad puedan ser consideradas como constante a través del elemento de volumen. En el siguiente análisis, el efecto de fuerzas gravitacionales serán despreciadas, y aquí ρ_0 y p_0 se toman con valores uniformes a través del medio[15]. El medio se asume como homogéneo, isotrópico y perfectamente elástico, ie., sin fuerzas disipativas, como las provenientes de viscosidad. Finalmente, el análisis puede ser limitado a ondas de relativamente pequeña amplitud así que cambios en la densidad del medio son pequeños comparados con el valor en equilibrio.

Las ondas acústicas planas tienen muchas características en común con las ondas longitudinales que se propagan a lo largo de una barra delgada. En base a esto, la ecuación que rige la propagación de ondas planas a través de un fluido confinado en un tubo rígido de sección transversal constante considera la relación entre cambios de presión con el fluido y la deformación del mismo en función de propiedades *termodinámicas* a lo largo del fluido, siendo una de ellas el principio básico de *conservación de masa*. [21]

Consideremos que una onda plana se mueve a lo largo del eje x , planos adyacentes de moléculas en el fluido son desplazados de sus posiciones de equilibrio como se muestra en la figura (2.4). En general, estos desplazamientos son función de la posición y el tiempo representados por $\xi(x, t)$. Primero hay que encontrar una ecuación que relacione estos movimientos con los cambios en la densidad del medio.

Para esto podemos aplicar el principio de conservación de masa en una sección transversal de área S de un fluido no perturbado contenido entre planos en x y $x + dx$, donde la masa de este fluido confinado es $\rho_0 S dx$, ρ_0 es la densidad del medio en equilibrio, ahora, vamos a pensar en el paso de una onda sonora, el plano originalmente en x es desplazado una distancia ξ a la derecha y el plano que estaba originalmente en $x + dx$, una distancia $\xi + (\partial\xi/\partial x)dx$, el volumen encerrado cambia por lo tanto a $S dx(1 + \partial\xi/\partial x)$. Por lo mismo, la densidad del fluido contenido entre las placas debe cambiar, pero la masa total permanece sin cambio, como se expresa en la siguiente ecuación.

$$\rho S dx \left(1 + \frac{\partial\xi}{\partial x}\right) = \rho_0 S dx \quad (2.8)$$

Si sabemos que la condensación s en cualquier punto se define como:

$$s = \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} \text{ o } \rho = \rho_0(1 + s) \quad (2.9)$$

donde ρ es la densidad instantánea en cualquier punto, remplazamos a ρ por $\rho_0(1 + s)$ y cancelamos el término común $\rho_0 S dx$ obtenemos

$$(1 + s) \left(1 + \frac{\partial\xi}{\partial x}\right) = 1 \quad (2.10)$$

Ya que las dos densidades cambian y los desplazamientos moleculares fueron considerados pequeños, podemos desprestigiar el producto $s\partial\xi/\partial x$ así que la ecuación 2.10 se simplifica a:

$$s = - \left(\frac{\partial\xi}{\partial x}\right) \quad (2.11)$$

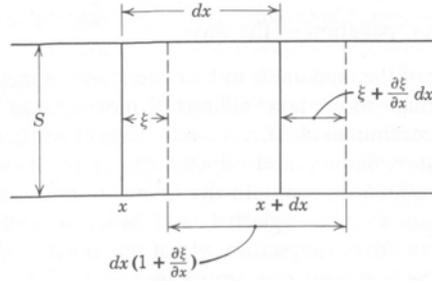


figura 2.4 Desplazamiento longitudinal de una onda sonora plana

Esta ecuación es conocida como la *ecuación de continuidad*, establece que cuando un plano de moléculas en el fluido a la derecha de un punto dado es desplazado mas hacia la derecha ocurre lo mismo en un plano similar a la izquierda del punto, i.e., cuando estos dos planos son separados por una distancia mayor a la separación de equilibrio, $\partial\xi/\partial x$ es positivo y la densidad de el fluido disminuye.

Una segunda propiedad de los fluidos que se usará para derivar la ecuación de onda es una propiedad termodinámica que relaciona los cambios en presión y densidad. En general, muchas relaciones existen, dependiendo de cual proceso termodinámico en particular este envuelto. Por ejemplo, la ecuación que gobierna un proceso *isotérmico* en un gas ideal es $(P/P_0) = (\rho/\rho_0)$ y para un proceso *adiabático* es $(P/P_0) = (\rho/\rho_0)^\gamma$, donde P y P_0 son la presión instantánea en cualquier punto y la presión constante en el medio en equilibrio respectivamente.

Debemos ahora decidir cual de los procesos termodinámicos es el mas apropiado para las compresiones y expansiones alternadas de un pequeño elemento de volumen Sdx (ver figura 2.4), por la acción de ondas acústicas. En general, cualquier compresión de un fluido requiere de un trabajo el cual es convertido en calor, y puede incrementar la temperatura si el proceso es muy lento, de tal manera que esta energía pueda fluir en los alrededores del fluido. Cuando un fluido trasmite ondas acústicas, el gradiente de temperatura entre las compresiones y expansiones adyacentes en un fluido son relativamente pequeñas. Por esto, un poco de energía

fluye de una parte comprimida del fluido antes de dejar de estar comprimido. Bajo estas circunstancias, el proceso termodinámico puede ser considerado como *adiabático*. Por lo tanto podemos asumir que este proceso es el que más se asemeja a los cambios de presión acústicos y de densidad en un fluido. Para generalizar nuestra derivación que aplique igual a todos los fluidos, i.e., a los líquidos y gases reales así como a los gases ideales, vamos a representar el proceso adiabático por la ecuación simbólica $P = P(\rho)$. La derivada de esta ecuación nos da:

$$dP = \left(\frac{dP}{d\rho} \right)_0 d\rho \quad (2.12)$$

En donde $(dP/d\rho)_0$ es la pendiente en el punto $P_0\rho_0$, de una gráfica adiabática de presión vs. densidad. Para los pequeños cambios que ocurren en las ondas acústicas, podemos reemplazar el incremento de presión cambiando dP con la presión acústica p y el incremento en densidad cambiando $d\rho$ por $\rho_0 s$ (ver ecuación 2.9) llegando a:

$$p = \left(\frac{dP}{d\rho} \right)_0 \rho_0 s \quad (2.13)$$

tomando

$$c^2 = \left(\frac{dP}{d\rho} \right)_0 \quad (2.14)$$

tenemos

$$p = \rho_0 c^2 s \quad (2.15)$$

Ecuación importante que relaciona la presión acústica y la condensación, finalmente, reemplazando s por su equivalente $-(\partial\xi/\partial x)$, de la ecuación 2.10 se obtiene:

$$p = -\rho_0 c^2 \frac{\partial\xi}{\partial x} \quad (2.16)$$

2.3.2. Ecuación de onda plana

Cuando un fluido es deformado de la manera descrita en la sección anterior, las presiones resultantes en las dos caras del elemento de volumen Sdx serán ligeramente diferentes, produciendo una fuerza neta la cual acelerará el elemento. Ya que la

fuerza externa que actúa en cada cara es igual al producto de la presión y el área de la cara, la fuerza neta que actúa sobre Sdx en la dirección positiva de x es:

$$dF_x = \left[p - \left(p + \frac{\partial p}{\partial x} dx \right) \right] S = -\frac{\partial p}{\partial x} dx S \quad (2.17)$$

En la derivación de esta ecuación, las fuerzas producidas por la presión de equilibrio P_0 han sido ignoradas ya que se cancelan. Es sólo el gradiente $\partial p/\partial x$ de la presión acústica lo que es fundamental en la fuerza neta producida sobre el elemento de volumen. Estableciendo esta fuerza neta igual al producto del elemento de masa $\rho_0 S dx$ por la aceleración obtenemos

$$-\frac{\partial p}{\partial x} = \rho_0 \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} \quad (2.18)$$

Para derivar esta ecuación se despreciaron las diferenciales de segundo orden entre aceleraciones $\partial^2 \xi/\partial t^2$ que ocurren en el medio en un punto fijo en el espacio x y las aceleraciones $d^2 \xi/dt^2$ del elemento de volumen en movimiento.

La ecuación 2.18 puede ser combinada con la ecuación 2.16 para eliminar cualquiera, ξ o p , obteniendo, respectivamente

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} \quad (2.19)$$

o

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} \quad (2.20)$$

Como dos formas particulares de la *ecuación de una onda plana acústica*. Ecuaciones similares también aplican a variables acústicas como la velocidad u y la condensación s . La solución para ξ es suficiente ya que una vez obtenida, el comportamiento de las otras variables acústicas se puede obtener fácilmente usando las relaciones de la sección anterior.

$$p = -\rho_0 c^2 \frac{\partial \xi}{\partial x}, \quad s = -\frac{\partial \xi}{\partial x}, \quad u = \frac{\partial \xi}{\partial t} \quad (2.21)$$

Un fluido no tiene por supuesto sus moléculas fijas en el medio, como lo hemos asumido en la derivación de la ecuación de onda. Incluso sin la presencia de una onda, las moléculas están en constante movimiento, con velocidades medias mucho

mayores a la velocidad asociada a una partícula por el movimiento de una onda. Sin embargo, desde un punto de vista estadístico, un pequeño elemento de volumen puede ser tratado como una unidad inalterable, ya que las moléculas que dejan el volumen son remplazadas por un número igual de moléculas, las cuales poseen propiedades idénticas, por lo que permanecen las propiedades macroscópicas del elemento inalterables. Como consecuencia, es posible hablar de los desplazamientos y velocidades de una *partícula* cuando se habla de ondas acústicas en un fluido de igual forma que se hace para ondas elásticas en sólidos. Sin embargo, es de destacar que una variable estadística como es la presión acústica representa más adecuadamente ondas acústicas y es usada casi exclusivamente para su medición.[5][11][28]

2.4. Soluciones de la ecuación de onda

2.4.1. Ondas armónicas planas

Las ondas armónicas planas [18]son soluciones de la ecuación de onda, de la forma

$$p = A \cos(\omega t - kx + \phi) \quad (2.22)$$

Siendo soluciones de ecuaciones de la forma 2.19 y 2.20.

Es común utilizar funciones exponenciales en lugar de trigonométricas para representar estas ondas, puesto que es mucho más fácil operar con exponenciales que con senos y cosenos. El cálculo elemental de variable compleja establece que

$$\exp(i\theta) = \cos \theta + i \sin \theta \quad (2.23)$$

luego la onda plana se puede escribir como la parte real de una función compleja

$$p = \operatorname{Re}\{A \exp[i(\omega t - kx + \phi)]\} = \operatorname{Re}\{A' \exp[i(\omega t - kx)]\} \quad (2.24)$$

$$A' = A \exp(i\phi)$$

representa una amplitud compleja. Esta notación es tan utilizada que normalmente cuando escribimos una onda en forma compleja se sobreentiende que se toma la parte real, por lo que se suele escribir

$$p = A' \exp[i(\omega t - kx)] \quad (2.25)$$

2.5. Fenómenos acústicos

La amplitud de una onda acústica que se transmite en un medio, se ve afectado por diversos fenómenos[20][27][12]

2.5.1. Resonancia

La resonancia es un fenómeno que se produce cuando un cuerpo capaz de vibrar es sometido a la acción de una fuerza periódica, cuyo periodo de vibración coincide con el periodo de vibración característico de dicho cuerpo.

En estas circunstancias el cuerpo vibra, aumentando de forma progresiva la amplitud del movimiento tras cada una de las actuaciones sucesivas de la fuerza.

2.5.2. Absorción

Cuando una onda sonora llega a una pared rígida (ideal) se refleja totalmente ya que la pared no se mueve y no absorbe energía de la onda. Las paredes reales no son nunca completamente rígidas, por lo que pueden absorber parte de la energía de las ondas incidentes, además el mismo medio puede absorber la energía.

Coefficiente de absorción. Sea E_i la energía de la onda incidente y E_r la de la onda reflejada por una pared. La diferencia entre estas dos energías E_a se denomina energía absorbida, y es la suma de las energías disipada E_d y transmitida E_t por la pared:

$$E_a = E_i - E_r = E_d + E_t \quad (2.26)$$

Se define el coeficiente de absorción del material como $\alpha = \frac{E_a}{E_i}$ con $0 < \alpha < 1$, el valor del coeficiente de absorción depende del material en el que se refleja la onda

y de la frecuencia de la misma.

2.5.3. Atenuación

Para visualizar el fenómeno de dispersión conviene notar que al perturbar sólo una partícula del medio, toda la energía de la perturbación será transferida a la partícula; sin embargo, a medida que la perturbación se propaga, el número de vecinos se incrementa y la energía tiene que distribuirse entre más partículas. Esto es, entre mas alejados estén los vecinos, del sitio originalmente perturbado, menor será la amplitud de su oscilación.

Conviene mencionar que existe otra forma de dispersión (“scattering”) la cual es producida por la presencia de zonas con distintas propiedades acústicas de tamaño similar al de la longitud de onda.

Esa reducción de amplitud puede representarse por $A = A_0 e^{-\alpha x}$, donde A_0 es la amplitud inicial, x es la distancia recorrida por la perturbación.

2.5.4. Impedancia acústica

La medida de oposición a la propagación de las ondas se conoce como impedancia acústica Z , función dependiente de la frecuencia del medio. Se caracteriza como la medida de la eficiencia con que la onda se propaga en un material, matemáticamente es la presión del sonido p dividida por la velocidad de la partícula v y la superficie S (en algunas ocasiones vS es referido como la velocidad del volumen), $Z = p/vS$. La unidad de la impedancia acústica es el Rayleigh (Rayl).

La impedancia acústica característica de un medio, como es en un sólido, líquido o gas es una propiedad del material que se define como:

$$Z_0 = \rho \cdot c \quad (2.27)$$

2.5.5. Propagación

En secciones anteriores, se ha hecho referencia a la propagación de ondas ultrasónicas en un medio o material. Sin embargo, cuando una onda UT viaja en diferentes medios existen cambios en la distribución de su energía al propagarse por

estos (efectos de reflexión, refracción, etc.). En esta sección se describen los efectos principales que sufre una onda UT cuando existen diferentes medios:

2.5.6. Reflexión, Refracción y Transmisión

Cuando una onda incide sobre una superficie frontera de dos medios, de distintas propiedades mecánicas, ópticas, etc, parte de la onda se refleja, parte se disipa y parte se transmite. La velocidad de propagación de las ondas, cambia al pasar de un medio a otro, pero no cambia la frecuencia angular.

Cuando la onda incidente llega a la frontera con cierto ángulo, la onda transmitida modifica su dirección original acercándose o alejándose de la normal. A esta desviación del rayo transmitido se le denomina refracción.

2.5.7. Difracción

Cuando en el medio existe un obstáculo o una abertura, la onda lo rodea o se propaga a través de ella, respectivamente, a este fenómeno se le conoce como difracción. Su magnitud depende de la relación que existe entre la longitud de onda y el tamaño del obstáculo o abertura. Si una abertura (obstáculo) es grande en comparación con la longitud de onda, el efecto de la difracción es pequeño, y la onda se propaga en líneas rectas o rayos, de forma semejante a como lo hace un haz de partículas. Sin embargo, cuando el tamaño de la abertura (obstáculo) es comparable a la longitud de onda, los efectos de la difracción son grandes y la onda no se propaga simplemente en la dirección de los rayos rectilíneos, sino que se dispersa como si procediese de una fuente puntual localizada en la abertura.

2.5.8. Dispersión

Una onda compleja sonora es separada en sus componentes frecuenciales a medida que pasa a través de un medio, normalmente medido por la tasa de cambio de velocidad con frecuencia. Esto ocurre cuando la onda viajante encuentra obstáculos (mucho mayores a la longitud de onda) o discontinuidades en el medio e incluso con cambios continuos en el medio acústico.

2.6. Generación de ultrasonido: transductores

Los aparatos electrónicos para música o sonido se pueden clasificar en los siguientes grupos: generadores, procesadores, grabadores, reproductores y transductores. Cada uno de ellos tiene una misión determinada: los generadores producen un sonido, los procesadores lo modifican, los grabadores lo almacenan en un medio determinado para su posterior reproducción en los reproductores. Lo que tienen todos en común, es que operan o producen sonido no como onda de presión, sino como una representación de esta en forma de señal. El enlace entre ambas se realiza mediante transductores.[22]

Un transductor es un dispositivo que convierte una señal de un tipo de energía en otra. La base es sencilla, se puede obtener la misma información de cualquier secuencia similar de oscilaciones, ya sean ondas sonoras (aire vibrando), vibraciones mecánicas en un sólido, corrientes y voltajes alternos en circuitos eléctricos, vibraciones de ondas electromagnéticas radiadas en el espacio en forma de ondas de radio o las marcas permanentes grabadas en un disco o una cinta magnética.

Existen diferentes tipos de transductores electroacústicos que se basan en leyes y propiedades físicas diferentes. A continuación vamos a describir los más importantes[53].

- **Electrostático o de condensador:** Cuando la separación entre las placas del condensador varía, también varía su capacitancia, lo que a su vez provoca una variación de voltaje entre las placas (micrófono). A la inversa, cuando una de las placas recibe una cantidad variable de carga eléctrica, la fuerza con la que atrae a la otra placa cambia, y como consecuencia ésta vibra (altavoz).
- **Dinámico:** Cuando una corriente alterna recorre una bobina, un campo magnético externo ejerce sobre ella una fuerza, que también es alterna (micrófono). Cuando una espira conductora se mueve dentro de un campo magnético externo, de forma que el flujo del campo magnético varíe con el tiempo, en la espira se induce una fuerza electromotriz (altavoz).
- **Magnético:** Es similar al dinámico; existe una pieza de material magnético (armadura) que se mueve mientras que la espira permanece en reposo.

- De carbón: Se utiliza un recipiente lleno de partículas de carbón. Cuando se aplica una presión en una de las paredes del recipiente, el área de contacto entre las partículas de carbón y sus vecinos también aumenta, favoreciendo el paso de corriente eléctrica de uno a otro (micrófono).[31]

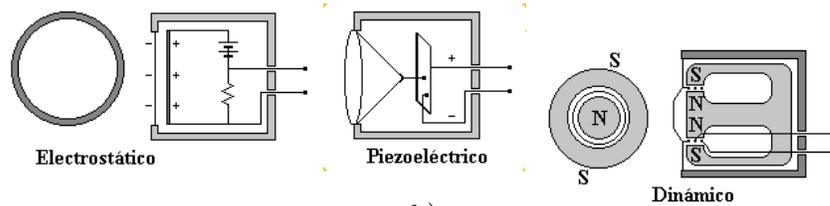


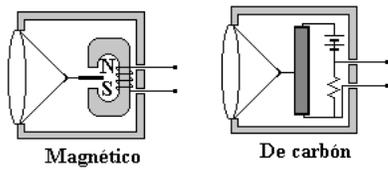
Figura 2.5 Transductores

a) Electrostatico

b)

Piezoelectrico

c) Dinamico



d) Magnetico

e) De carbon

2.6.1. Efecto Piezoelectrico

El efecto piezoelectrico, fue descubierto por Pierre y Jacques Curie en 1880. El efecto consiste en aplicar una tension mecanica o electrica a un cristal, produciendo

un esfuerzo que altera sus dimensiones físicas.

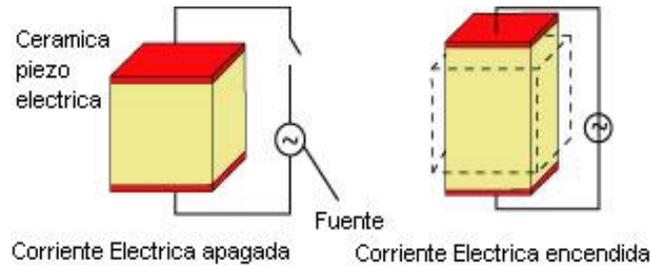


Figura 2.4 Efecto piezoeléctrico

En la figura 2.4 se ilustra como se le aplica al cristal (sintético o natural) una presión y obtenemos una diferencia de potencial en microvolts. Esto es posible gracias a que los materiales de tipo piezoeléctrico (natural o sintético) son no isotrópicos (no poseen las mismas propiedades en cada eje polar) y además el efecto piezoeléctrico se puede obtener y ser reversible si por uno de los ejes polares aplicamos una corriente (eje X) obtendremos del otro lado (eje Y) una deformación de tipo mecánica y viceversa.

Si aplicamos una carga eléctrica alterna de alta frecuencia al cristal este oscilará a una determinada frecuencia, es decir, vibrará de acuerdo a las variaciones alternas.

Las caras del cristal se moverán una respecto a la otra. Ahora bien, si una de las caras ejerce presión sobre la superficie de un medio, se producirán ondas ultrasónicas, que penetran en el medio propagándose.[30]

2.6.2. Transductores piezoeléctricos

La conversión de pulsos eléctricos a vibraciones mecánicas y viceversa es la base para la prueba ultrasónica. El elemento activo es básicamente un material polarizado (es decir algunas partes de la molécula se cargan positivamente, mientras que otras partes de la molécula se cargan negativamente) con los electrodos unidos a dos de sus caras opuestas. Cuando un campo eléctrico se aplica a través del material, las moléculas polarizadas se alinearán con el campo eléctrico, dando por resultado dipolos inducidos dentro de la estructura molecular o cristalina del material. Esta

alineación de moléculas hará cambiar de dimensiones al material. Este fenómeno se conoce como electrostricción. Además, un material permanente-polarizado tal como cuarzo (SiO_2) o titanato de bario (BaTiO_3) producirá un campo eléctrico cuando el material cambia dimensiones como resultado de una fuerza mecánica impuesta.

El elemento activo de la mayoría de los transductores acústicos usados hoy es de cerámica piezoeléctrica, que pueden producir diversos modos de onda. Precediendo el advenimiento de la cerámica piezoeléctrica en los comienzos de los años 50, los cristales piezoeléctricos hechos de cristales del cuarzo y los materiales magnetostrictivos fueron utilizados sobre todo. Cuando la cerámica piezoeléctrica fue introducida, pronto la hicieron el material preferente para los transductores, debido a sus buenas características piezoeléctricas y a la facilidad de la fabricación en una variedad de formas y de tamaños. Durante los años 60 por las composiciones de titanato zirconato de plomo (PZT) se comenzó a utilizar esta cerámica para hacer transductores ultrasónicos. Los nuevos materiales tales como piezo-polímeros y compuestos también se están utilizando en algunas aplicaciones.

El grueso del elemento activo es determinado por la frecuencia deseada del transductor, esto también depende de la geometría ya que se pueden encontrar transductores cilíndricos, en barra de disco, etc, en este caso solo consideraremos el caso de un transductor cilíndrico, para explicar de manera más sencilla el fenómeno. Un elemento fino de la lámina vibra con una longitud de onda que sea dos veces su grueso. Por lo tanto, los cristales piezoeléctricos se cortan a un grueso que sea $1/2$ la longitud de onda irradiada deseada. Cuanto más alta es la frecuencia del transductor, más delgado es el elemento activo.

2.6.3. Características de transductores piezoeléctricos

El transductor es una parte muy importante del sistema ultrasónico. Según lo discutido anteriormente, el transductor incorpora un elemento piezoeléctrico, que convierte señales eléctricas en vibraciones mecánicas (modo transmisor) y vibraciones mecánicas en señales eléctricas (modo receptor). Muchos factores, incluyendo el material, construcción mecánica y eléctrica, y las condiciones de carga mecánica y eléctrica externas, influyen el comportamiento de un transductor. La construcción mecánica incluye parámetros tales como el área superficial de la radiación,

humedad, contenedor, el tipo del conector y otras variables de la construcción física.[29]

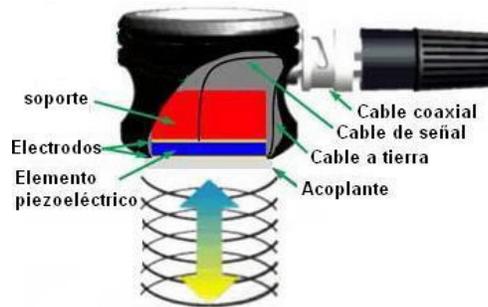


Figura 2.5 Corte de un transductor

El corte típico de un transductor se muestra en la figura 2.5. En la sección anterior se mencionó que el elemento piezoeléctrico es cortado $1/2$ de la longitud de onda deseada, para conseguir la mayor cantidad de energía posible del transductor se pone un acoplante entre el elemento activo y la cara del transductor. La configuración óptima del acoplante es alcanzada acoplando una capa con impedancia de modo que su grueso sea $1/4$ de la longitud de onda deseada. Esto guarda las ondas que fueron reflejadas dentro de la capa que se acoplo en la fase en que salen de la capa (según lo ilustrado en la imagen anterior). Para los transductores de contacto, el acoplante se hace de un material que tenga una impedancia acústica entre el elemento activo y el acero. Los transductores de inmersión tienen una capa acoplada con una impedancia acústica entre el elemento activo y el agua. Los transductores de contacto también incorporan una placa de desgaste para proteger la capa acoplada y el elemento activo contra el desgaste.[32]

El material donde se apoya el cristal tiene una gran influencia en las características del transductor. Usar un material con una impedancia similar a la del elemento activo producirá una respuesta más eficaz. Tal transductor tendrá una anchura de banda estrecha dando por resultado una sensibilidad más alta. Cuando la diferencia en impedancia entre el elemento activo y donde se apoya se incrementa, la

penetración en el material aumenta pero la sensibilidad del transductor se reduce.

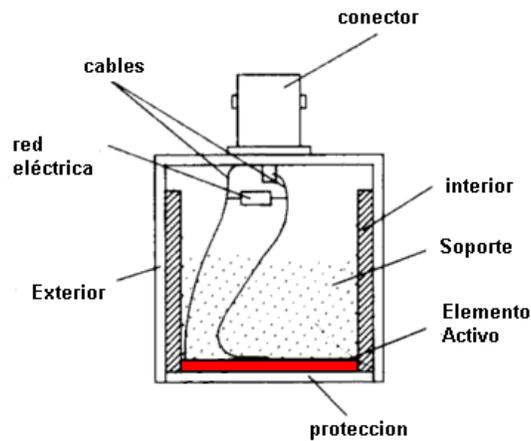


Figura 2.6 Esquema estructura interna de un transductor

Construcción basica del Transductor

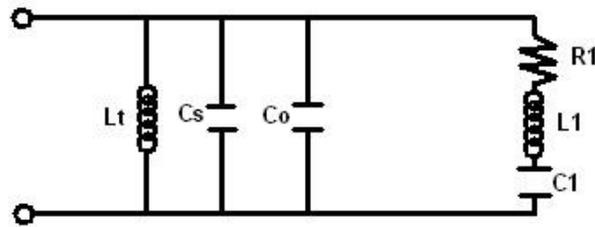


Figura 2.7 Circuito equivalente de un transductor

L_t =Inductancia eléctrica de sintonía (es utilizada para eliminar el efecto de C_s , C_o)

C_s =Capacitancia en paralelo por los cables, alambres, etc.

C_o =Capacitancia del cristal piezoelectrico en forma circular

C_1, L_1, R_1 =Representan las partes móviles del transductor

Fradfield en el año de 1953, investigó las atenuaciones internas, montando al cristal en una base de plástico, logrando obtener un material con características de alta atenuación, empleada en la actualidad para la fabricación de transductores.

De acuerdo a la figura 2.6, el cristal es montado sobre una base y en la cara posterior tiene un material de amortiguamiento (Sulfato de magnesio - litio, aluminio-cuarzo), lo que nos dará la impedancia adecuada y amortiguará las señales indeseadas, producidas por los ecos.[29]

2.7. Principio de Huygens

El principio fue originalmente concebido en el siglo XVII para explicar los fenómenos ópticos, este principio aplica de igual forma a la propagación del sonido. El principio establece que un frente de onda puede ser considerado como producto de fuentes secundarias. La figura(2.9) ilustra la construcción por Huygens de un frente de onda en un tiempo $t + \Delta t$ de un frente de onda anterior en el tiempo t .



figura 2.8 Principio de Huygens

El nuevo frente de onda es la envolvente de radio $c\Delta t$ centrada en los puntos en el frente de onda anterior. Por esto, una onda plana permanece plana y una onda esférica permanece como una onda esférica con un radio mayor. Esta forma de ver la propagación de una onda ayuda a entender mejor una variedad de fenómenos

ondulatorios, tales como la difracción.[25]

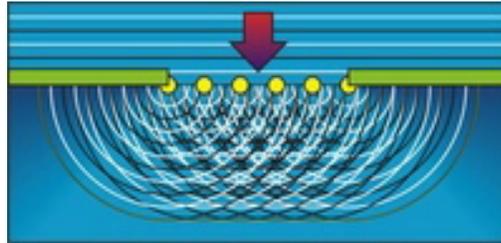


Figura 2.9 Fuentes puntuales, las cuales, forman un frente plano

2.7.1. Campos irradiados de transductores ultrasónicos

El haz producido por un transductor piezoeléctrico depende de la frecuencia y de la geometría, mas específicamente de la relación λ/D con D el diámetro, se comporta como fuente simple o en este caso como un pistón o placa, el haz no se origina de un punto, por el contrario, se origina en varios puntos, una aproximación de cómo se comporta el campo acústico es considerando la cara del transductor como un conjunto de fuentes puntuales que emiten c/u ondas esféricas y el campo en cada punto del espacio frente al transductor es la contribución de cada una de las fuentes puntuales (Principio de Huyges). Los transductores redondos se conocen como transductores de pistón porque el campo generado se asemeja a una masa cilíndrica delante del transductor. El campo de un transductor piezoeléctrico típico

se muestra en la figura (2.10).[6]

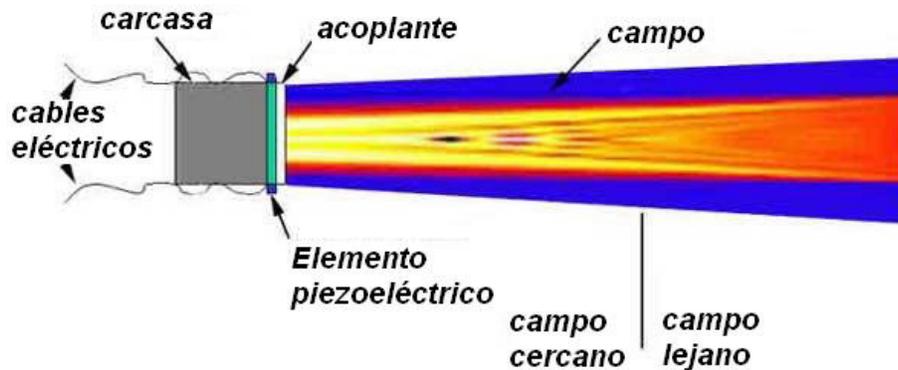


Figura 2.10 Campo irradiado por un transductor

Puesto que el ultrasonido se origina de varios puntos en la cara del transductor, la intensidad del ultrasonido a lo largo del haz es afectada por interferencia constructiva y destructiva de la onda según lo discutido anteriormente. Éstos a veces también se refieren como efectos de la difracción. Esta interferencia de la onda conduce a las fluctuaciones extensas en la intensidad cerca de la fuente y se conoce como el campo cercano o zona de Fresnel. Debido a variaciones acústicas dentro de un campo cercano, puede ser extremadamente difícil evaluar exactamente defectos en materiales cuando se colocan dentro de esta área.

Las ondas de presión se combinan para formar un frente relativamente uniforme en el extremo del campo cercano. El área más allá del campo cercano donde está más uniforme el haz ultrasónico se llama el campo lejano o zona de Fraunhofer. En el campo lejano, el haz se separa hacia fuera en un patrón que se origina en el centro del transductor. La transición entre el campo cercano y el campo lejano ocurre en una distancia, N , y se conoce como el “foco natural” de un transductor plano. La distancia cercana/lejos del campo, N , es importante porque las variaciones de la amplitud que caracterizan al campo cercano cambia a un suave decaimiento de la amplitud en este punto. El área un poco más allá del campo cercano es donde la onda se comporta bien y tiene fuerza máxima. Por lo tanto, los resultados óptimos

de la detección serán obtenidos cuando los defectos ocurren en esta área.[47]

2.7.2. Zona de Fresnel

También denominado campo cercano, es donde los haces ultrasónicos se propagan en forma radial. Dentro de esta zona, el poder de penetración ultrasonico esta restringido en su totalidad a la anchura del haz, encontrando su fin a una profundidad determinada, la cual podemos calcular con la ayuda del diametro del transductor D o con el radio r y su longitud de onda λ

$$P_f = r^2/\lambda = D^2/4\lambda \quad (2.28)$$

2.7.3. Zona de Fraunhofer

Es donde el haz ultrasónico se dispersa. También conocida como campo lejano. Se puede calcular el valor de dispersión del haz de acuerdo a la siguiente relacion:[26]

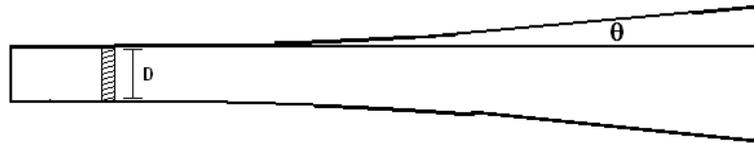


Figura 2.11 apertura del haz

$$\sin \theta = 1,22\left(\frac{\lambda}{D}\right) \quad (2.29)$$

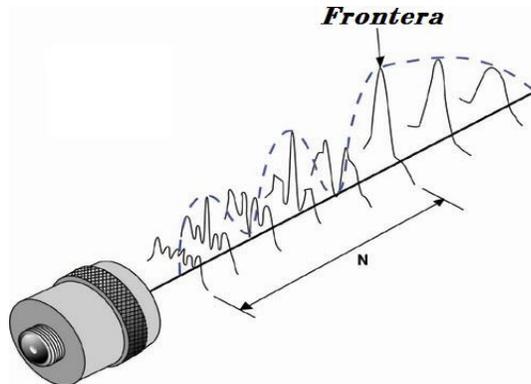


figura 2.12 Frontera entre el campo cercano y lejano

2.7.4. Apertura del haz del transductor

Los transductores circulares se conocen como transductores de pistón como se dijo anteriormente. Sin embargo la energía del haz no permanece en un cilindro, sino que por el contrario se separa mientras que propaga a través del material. Esto se conoce como separación del haz o divergencia del haz o difracción ultrasónica. Debe observarse que hay realmente una diferencia entre la separación del haz y la divergencia del haz. La separación del haz es una medida de todo el ángulo del lóbulo principal del haz en el campo lejano. La divergencia del haz es una medida del ángulo a partir de un lado del haz al eje central del haz en el campo lejano. Por lo tanto, la separación del haz es dos veces la divergencia del haz.

Aunque la separación del haz debe ser considerada al realizar una inspección ultrasónica, en el campo lejano, o la zona de Fraunhofer, la presión máxima se encuentra siempre a lo largo del eje acústico (línea central) del transductor. Por lo tanto, las reflexiones más fuertes vienen del área directamente delante del transductor.

La separación del haz ocurre porque la partícula que vibra del material (en el que está viajando la onda) no transfiere siempre toda su energía en la dirección de la propagación de la onda. Si las partículas no se alinean directamente en la dirección de la propagación de la onda, algo de la energía conseguirá transferirse con cierto

ángulo. (Lo qué sucede cuando una bola golpea otra bola levemente excéntrica). En el campo cercano las ondas interfieren, llenando el campo de fluctuaciones. Al principio del campo lejano, sin embargo, la fuerza del haz es siempre más grande en el centro del haz y disminuye cuando va hacia fuera.

Para un transductor plano de pistón, se puede calcular la separación del haz en función del diámetro del transductor (d), la frecuencia (f), y de la velocidad del sonido (v) en el medio líquido o sólido. Este ángulo representa una medida del centro del eje acústico al punto donde la presión ha disminuido a la mitad (-6 DB) en el campo lejano.[47]

2.8. Transformada de Hilbert

En matemáticas y en procesamiento de señales, la transformada de Hilbert es un operador lineal el cual toma una función $u(t)$, y produce una función $H(u)(t)$, con el mismo dominio. Es una herramienta básica en el análisis de Fourier, y provee un método concreto para obtener el conjugado de una función o serie de Fourier. La transformada de Hilbert esta íntimamente relacionada con el teorema de Paley-Wiener.

La transformada de Hilbert puede ser pensada como la convolución de $u(t)$ con la función $h(t) = 1/\pi t$. Ya que $h(t)$ no es integrable, las integrales que definen la convolución no convergen. En lugar de esto la transformada de Hilbert se define usando el valor principal de Cauchy (denotado por v.p.) Explícitamente, la transformada de Hilbert de una función (o señal) $u(t)$ esta dada por:

$$H(u)(t) = v.p. \int_{-\infty}^{\infty} u(\tau)h(t - \tau)d\tau$$

2.9. Transformada de Fourier

En matemáticas, la transformada continua de Fourier es una operación que transforma una función de una variable real en otra. La nueva función es frecuentemente llamada representación en el dominio de la frecuencia de la función original, la cual nos da las frecuencias presentes en esta función. En este caso específico, ambos los

dominios de las funciones originales y la representación en el dominio de la frecuencia son continuos y sin límites. El término transformada de Fourier puede referirse a ambos, la representación en el dominio de la frecuencia de una función o una fórmula que “transforma” una función a otra

Hay varias convenciones comunes para definir la transformada de Fourier como una función integrable de Lebesgue

$$F(v) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-2\pi i vt} dt \text{ con } v \text{ un número real}$$

Cuando la variable independiente t representa el tiempo, la transformada v representa la frecuencia ordinaria (Hz). Bajo condiciones favorables f puede ser reconstruida de F por la transformada inversa

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} F(v)e^{2\pi i vt} dv \text{ con } t \text{ un número real}$$

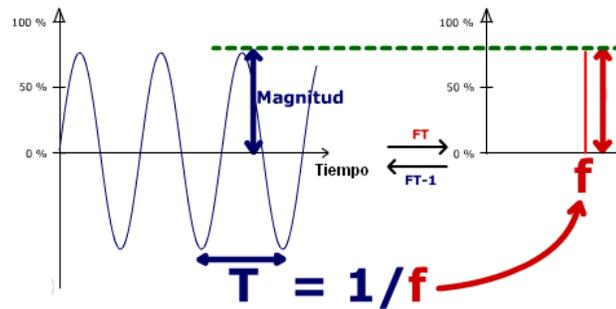


Figura 2.13 Transformada de Fourier

Capítulo 3

Ensayos no Destructivos por Ultrasonido

Los Ensayos no Destructivos (END) son técnicas que emplean métodos no invasivos para la detección y localización de discontinuidades y/o defectos en productos, partes, piezas o componentes en servicio además de caracterizar la pieza. Estas pruebas son realizadas de manera que no afectan las propiedades físicas o químicas así como las dimensiones del material en inspección. Los END también permiten realizar control de calidad en los componentes analizados, ya que pueden inspeccionar productos soldados, fundidos, forjados, laminados, etc; en casi cualquier material, por lo que tienen aplicación en el campo electrónico, siderúrgico, automotriz, metalúrgico, naval, de comunicaciones y transporte, entre otras[33]

3.1. Evaluación No Destructiva

En los END, el análisis no sólo se concentra en la localización de las fallas, sino también en la estimación de las propiedades y características de éstas; por ejemplo, estimar el tamaño, forma y orientación de las fallas. Además, otra finalidad de la evaluación usando técnicas no destructivas es la caracterización de las propiedades físicas del material en inspección.

Para la evaluación no destructiva es necesario considerar cuales son las técnicas y estrategias capaces para la detección y distinción de todas las fallas o defectos pre-

sentos en el material en inspección, como también tener modelos físico-matemáticos que puedan identificar cuales fallas y defectos son importantes, así como estimar las propiedades de estos (tamaño, forma, etc.) [52].

Por medio de la evaluación no destructiva podemos obtener la siguiente información [33]:

- Evaluación y Detección de Fallas en los materiales.
- Determinación de la localización de fallas.
- Caracterización de las dimensiones de las fallas o propiamente de las dimensiones del material.
- Caracterización de la estructura y microestructura del material.
- Estimación de las características físicas del material.
- Medidas de la respuesta dinámica y de esfuerzos en el material.
- Clasificación y determinación de la composición química del material.

3.2. Métodos de END

Existen diversos métodos empleados en la inspección de materiales y en particular hay una creciente investigación relacionada a los END, por ser una aplicación de interés en diferentes actividades. En la industria emplean métodos como:[33][34].

- **Ensayo Visual u Óptico:** Es el método más común y básico para la determinación de fallas en un material. Un inspector por medio de herramientas para mejorar la visualización (lupas, microscopios, etc.) en el material toma decisiones si existe o no una falla. Los ensayos visuales u ópticos incluyen la inspección visual automatizada, que trata de utilizar las disciplinas de visión e inteligencia artificial para controlar la calidad visual de los productos industriales, para evitar las inspecciones de escenas repetitivas y monótonas, que son fatigosas y molestas para los humanos.

- **Ensayos de Penetración de líquidos:** método usado para revelar fallas debido a fracturas superficiales, mediante la aplicación de un tinte coloreado o fluorescente al material. Esta técnica está basada en la capacidad de un líquido a filtrarse en una fractura superficial por la acción capilar.
- **Ensayos de Partículas Magnéticas:** utiliza campos magnéticos y partículas magnéticas pequeñas, tales como limaduras del hierro para detectar defectos en materiales. El único requisito para lograr pruebas efectivas es que el material examinado debe ser un material ferromagnético, como es el hierro, el níquel, el cobalto, o algunas de sus aleaciones.
- **Ensayos Electromagnéticos:** o de corriente de Eddy es un método de END que utiliza los principios del electromagnetismo. Estos ensayos con base a la corriente de Eddy son óptimos para detectar fracturas superficiales, como también realizar pruebas de conductividad eléctrica y medidas de espesor.
- **Radiografía:** consiste en incidir una fuente de radiación de rayos X al material en inspección de tal manera que la imagen resultante (radiografía) muestre los cambios en las características físicas del material.
- **Ensayos por Ultrasonido:** mediante el empleo de los ultrasonidos (UT) se detectan imperfecciones o cambios en las propiedades de los materiales. Una técnica de adquisición muy usada al emplear ultrasonidos es el método de pulso-eco; que al incidir una señal ultrasónica al material en inspección, las reflexiones (ecos) que esta sufre son recibidas por un transductor receptor mostrando los cambios en las características mecánicas del material.

3.3. END por Ultrasonido

La inspección por ultrasonido es una de las técnicas más prometedoras para los END por tener un bajo costo y requerir menor infraestructura en comparación con otros métodos.

Además, empleando los ensayos por ultrasonidos se tiene la opción de automatizar la evaluación de los materiales por medio de un sistema de diagnóstico durante

un proceso de manufactura y obtener información acerca de la posición, forma y tamaño de una o múltiples fallas como son: las inclusiones, agujeros y defectos.

Una ventaja muy importante al utilizar los END por ultrasonido es que no es nocivo para el humano, como podría ser el uso de otros métodos como radiaciones de rayos X, sustancias tóxicas o corrientes eléctricas de alto amperaje.[7]

3.4. Métodos de adquisición para ensayos por ultrasonidos

En los END-UT, generalmente, se consideran tres métodos de adquisición, según la configuración del transductor o arreglo de éstos. A continuación se describen las características principales de estos métodos:[9][46]

- **Método Pulso - Eco:** Por medio de un transductor o arreglo se emite un pulso ultrasónico (ver Figura 3.1). Tal pulso viaja por el material en análisis, con la característica que al existir un cambio de medio (impedancia acústica diferente), parte de la energía es reflejada (eco) y parte es transmitida (con posibles efectos de refracción), por lo que continua viajando por el medio. Los ecos producidos por la reflexión del pulso son recibidos por los mismos transductores que generaron el pulso inicial.

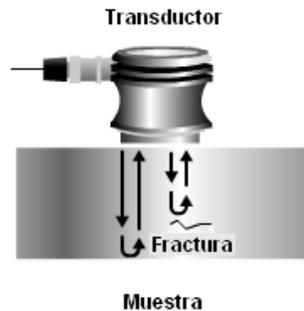


Figura 3.1 Pulso-eco

- **Método de Transmisión:** De igual manera que la técnica de pulso - eco, utiliza los efectos de reflexión y transmisión de los pulsos UT al viajar por

diferentes medios. Sin embargo, la configuración que emplea esta técnica (ver Figura 3.2) difiere al considerar un transductor para el proceso de transmisión y otro para el de recepción. De este modo, la detección de fallas se realiza midiendo la energía recibida en comparación a la energía transmitida de los pulsos UT.

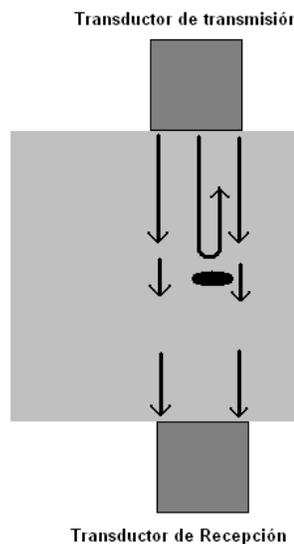


Figura 3.2 Transmision

- **Método de Resonancia:** En este método se envían ondas ultrasónicas de diversas frecuencias al material en inspección. La transmisión de estas ondas se lleva a cabo hasta que una onda estacionaria se establece. Esto indica que la frecuencia de oscilación que maneja el transductor coincide con una frecuencia resonante del material en inspección, resultando en un incremento momentáneo en la energía generada por el transductor (Figura 3.3). Defectos o fallas de dimensiones grandes en materiales no homogéneos pueden establecer ondas

estacionarias y así ser detectadas.

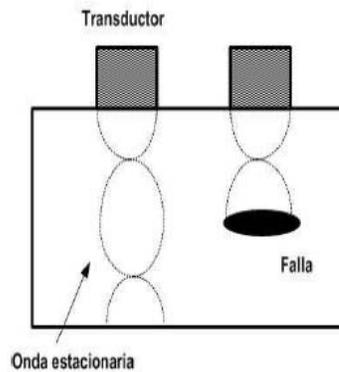


Figura 3.3 Esquema metodo de resonancia

3.5. Formatos de Visualización

Las medidas ultrasónicas pueden ser visualizadas de diferentes maneras. Existen tres presentaciones típicas en el área de los END: A-scan, B-scan y C-scan. Cada presentación proporciona diferentes formas de visualizar y evaluar las regiones en inspección.[48]

3.5.1. Presentación A-Scan

La presentación por A-scan visualiza la intensidad de la onda UT recibida en función del tiempo. La onda reflejada es caracterizada a lo largo de un eje de una variable temporal o del número de muestras de la señal. En la Figura 3.4 se presenta la forma de obtención de una visualización A-scan.

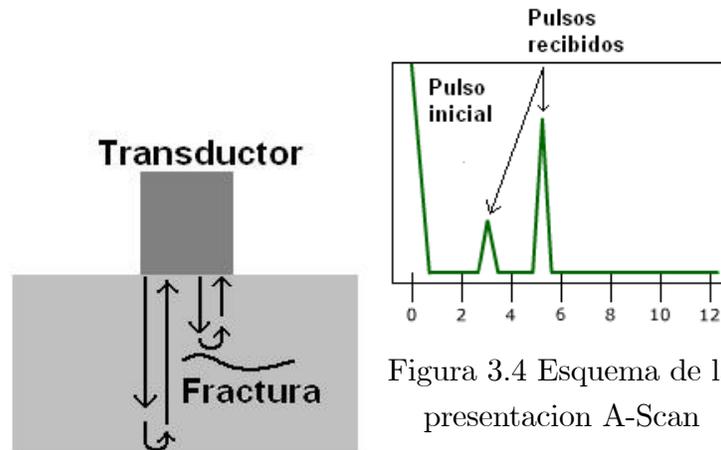


Figura 3.4 Esquema de la presentación A-Scan

3.5.2. Presentación B-Scan

La presentación por B-scan es realizada al variar la posición dy de un transductor sobre un eje perpendicular al eje de propagación de la onda UT, o bien el arreglo de transductores. En consecuencia, se capta un conjunto de ondas reflejadas por el material en inspección obteniendo una representación en dos dimensiones (Figura 3.5).

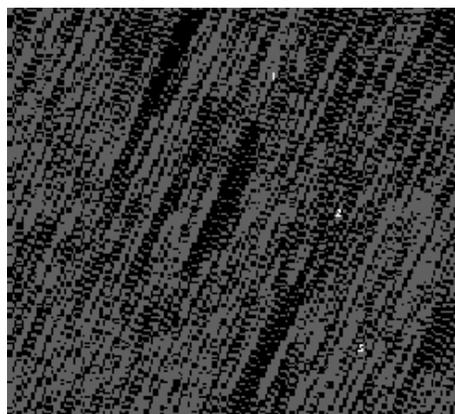


Figura 3.5 Presentacion B-Scan

3.5.3. Presentación C-Scan

Para obtener una presentación C-scan, se captan las ondas UT reflejadas por medio de la variación de la posición de un transductor sobre un plano perpendicular a la dirección de propagación de las ondas, es decir, se adquieren un conjunto de imágenes en presentación B-scan. Así, se puede obtener imágenes que representan cortes transversales del medio en exploración.



Figura 3.6 Presentacion C-Scan

3.6. Técnicas Digitales para END

Las técnicas digitales para los END comprenden los métodos, algoritmos y estrategias digitales para mejorar la información y facilitar la interpretación de las señales adquiridas que previamente han interactuado con el medio a explorar. El procesamiento digital de las señales ultrasónicas ha abierto nuevas expectativas en el diagnóstico, detección y evaluación de fallas en materiales utilizando técnicas como: Extracción de la información frecuencial de las señales UT con la Transformada de Fourier como herramienta principal; mediante técnicas de análisis estadístico de datos, reconocimiento de patrones e inteligencia artificial para la detección y estimación de señales [35], [36]; siendo las señales UT (provenientes de materiales no homogéneos) señales no estacionarias, se logra la estimación y el filtrado de éstas por medio de técnicas adaptativas; para la mejora de la resolución lateral y axial de las imágenes UT con ayuda de métodos de formación de haces [37], [38], [39]; y por

medio del análisis tiempo - frecuencia [40], [41], [42] y tiempo - escala [43], [44], se realiza la detección, estimación, localización y realce de fallas o defectos presentes en los materiales.

Mediante la técnica pulso-eco es posible determinar el grosor de la muestra y la ubicación de las fallas mediante el tiempo de vuelo, el tiempo de vuelo es el tiempo que tarda el pulso en recorrer el material ida y vuelta al transductor por lo tanto se define como el tiempo que tarda el pulso en recorrer dos veces el material.

Capítulo 4

Simulación

Los END han adquirido gran importancia por su amplia gama de aplicaciones, con las pruebas ultrasónicas no destructivas se pueden conocer las propiedades físicas de los materiales, con esto se pueden detectar defectos e inhomogeneidades. Sin embargo, los materiales modernos presentan un comportamiento elástico anisotrópico lo cual lleva a una propagación de ondas complicada, principalmente en los fenómenos acústicos. Para asegurar la confiabilidad de las técnicas de inspección se tienen que considerar las propiedades acústicas de los materiales, la influencia de inhomogeneidades microestructurales y los efectos de superficies no planas sobre la propagación de las ondas ultrasónicas. Con respecto a esto, la simulación y la optimización en la prueba ultrasónica ha ganado una importancia considerable, donde el modelado matemático provee un método simple de apoyo al análisis.[14]

La simulación de END es uno de los campos recientes de investigación. Mirando la física subyacente, los problemas en los END son causados por un lado por las características micro y macroscópicas como inhomogeneidades y anisotropías y por otro lado por la presencia de componentes complicados y distintas configuraciones de los defectos. Ambos pueden resultar en problemas considerables en el rendimiento de las pruebas y en la interpretación de los resultados de inspección. Las soluciones sencillas como adaptaciones basadas en experiencias en la configuración experimental son en general insuficientes, inseguras y de alto costo. La mejor elección es combinar la experiencia práctica con el modelado teórico. La simulación de la prueba de los END utilizando modelos apropiados permite realizar estudios fundamentales y

obtener resultados simulados cuantitativos.

La aplicación de los métodos numéricos basados en las diferencias finitas o en la técnica de integración finita provee resultados exactos, pero el cálculo computacional es muy pesado y los requisitos del equipo de cómputo son grandes, especialmente cuando se realizan simulaciones en tres dimensiones. Los métodos analíticos permiten realizar la simulación de manera menos exhaustiva por lo que son ventajosos en vista del tiempo requerido para los cálculos. Generalmente, estos enfoques tienen que ser seleccionados de acuerdo con el problema respectivo.

En los enfoques analíticos aplicables a los materiales de estructura compleja el método pulso-eco ha probado ser muy provechoso para la explicación de ciertos fenómenos y para optimizar las técnicas de inspección ultrasónicas. El tiempo de vuelo e información relacionada a este pueden inferirse de estos modelos.

En este capítulo se describe el desarrollo del programa realizado en el presente trabajo. Este consiste en la simulación del análisis de materiales multi-capas mediante la técnica pulso-eco. Consideramos un medio continuo como fuentes puntuales que emiten radiación acústica, basados en el principio de Huygens.

Cuando se hace incidir en un material un haz ultrasónico proveniente de un transductor redondo el haz se dispersa, la región visible del transductor es el área de un círculo de radio r definida por un cono con ángulo θ , la energía procedente del transductor es dividida entre todos los puntos que se encuentren dentro de la región visible, los puntos más alejados del centro de la región tendrán menor energía, esto se debe a la distancia recorrida por el haz, cuando el haz llega a la partícula 1 (figura 4.1) presenta un ángulo θ_1 y para la partícula 2 llega con un ángulo θ_2 estos ángulos son diferentes entre sí como se observa en la figura 4.1 $\theta_1 > \theta_2$, los segmentos de recta ab son menores que cd por lo que el área del triángulo abe es menor al triángulo cde . La energía para la partícula 1 se divide en el área definida por $A_1 = (ab)\text{sen}\theta_1$, para la partícula 2 el área es $A_2 = (cd)\text{sen}\theta_2$, para esta simulación se tomó una región visible del transductor pequeña, por lo que las partículas uno y dos se encuentran muy próximas, por lo que los ángulos $\theta_1 \approx \theta_2$, además $ab \approx cd$, esto hace que $A_1 \approx A_2$ por lo que la energía que llega a la partícula uno y dos sean prácticamente iguales, en esta simulación estamos considerando una región visible pequeña. y un comportamiento en dos dimensiones para simplificar el algoritmo.

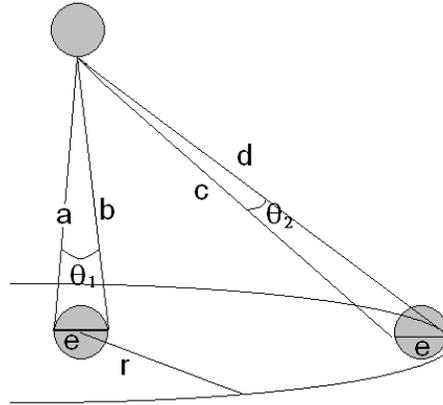


Figura 4.1 region visible

La simulación que desarrollamos consiste en generar imágenes de materiales multi-capas que pueden o no tener fallas dentro de las capas.

El esquema de esta simulación se muestra en la figura (4.1).

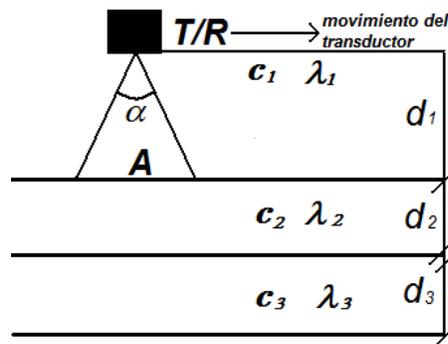


figura 4.1 esquema de la simulacion

Donde T/R se refiere al transductor ultrasónico que funcionara como transmisor (T) y receptor (R) que emite un pulso de cierta longitud a una frecuencia específica. Que ilumina una región A enfrente del T/R dada por un ángulo α , conocido como región visible. El transductor se encuentra en el medio 1 (acoplante), con velocidad de propagación c_1 , densidad ρ_1 y espesor d_1 .

La región iluminada A la podemos considerar como un conjunto de puntos sucesivos separados una distancia de $\lambda/8$ y que al ser iluminadas por el pulso generado por T/R se convierten en fuentes emisoras de energía acústica capaces de iluminar la segunda capa, (ver figura 4.2), a su vez la capa 2 al ser iluminada por las fuentes puntuales de la capa anterior, se convierte en emisores de energía.

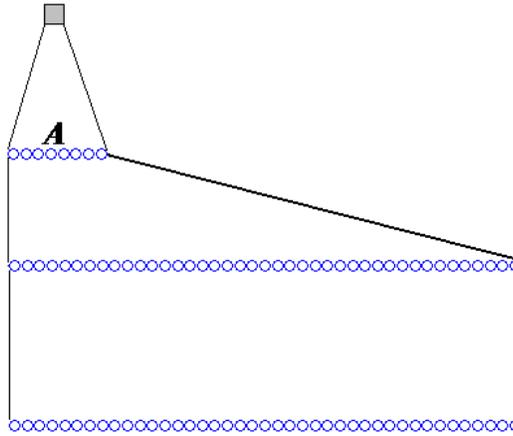


figura 4.2 Campo visual del transductor y las fuentes

Enfocándonos en cada punto sucede lo siguiente: el T/R emite un pulso y parte de la energía excita a un punto de la primera capa (ver figura 4.3) la energía que llega a e_{1i} , atenuada por la distancia d_{1ii} , y por la distribución de la misma en la región visible del T/R , parte se refleja hacia T/R y la otra se transmite al medio 2

(ver figura 4.4).

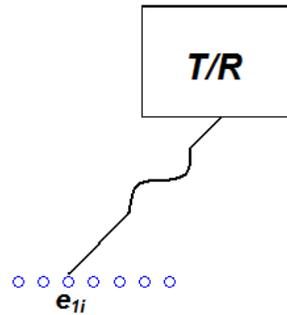


Figura 4.3
Interacción del
transductor con las
fuentes

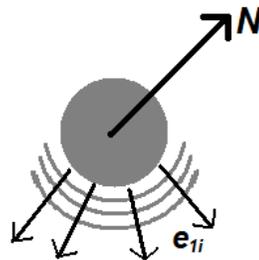


figura 4.4 Esquema
de una fuente
perteneciente a las
capas

El pulso recibido por el T/R debido a la fuente e_{1i} es una versión atenuada y retrasada del pulso original. El retraso se calcula:

$$t_{1i} = \frac{2d_1}{c_1} \quad (4.1)$$

Conocido como tiempo de vuelo.

La fuente e_{1i} ilumina todo el medio 2 y recibirá contribuciones de cada una de las fuentes e_{2i} como versiones atenuados y retrasados del pulso que emite e_{1i} , entonces e_{1i} al recibir todas las contribuciones las envía al T/R (figura 4.4).

Este procedimiento se hace para todas las fuentes e_{ij} y el transductor T/R es el integrador de todas las reflexiones de cada fuente.

Cabe mencionar que el transductor T/R se considera como si fuera un solo punto emisor capaz de generar un pulso que únicamente ilumina una región específica.

4.1. Implementación del Algoritmo

Para hacer la simulación de las pruebas ultrasónicas en materiales multicapas lo primero que se hizo fue diseñar un programa en la plataforma *MATLAB* para generar una señal sinusoidal de frecuencia, amplitud modulada y longitud tal que emulara el pulso ultrasónico que emite un transductor específico y discretizara el material multicapas.

El diagrama de bloques del programa general se muestra en la Figura 4.5, los nombres de los procesos se han asignado según el objetivo de éstos y así generalizar la metodología propuesta. El programa es válido para la simulación de materiales multicapas y permite modificar los parámetros para simular distintos materiales.

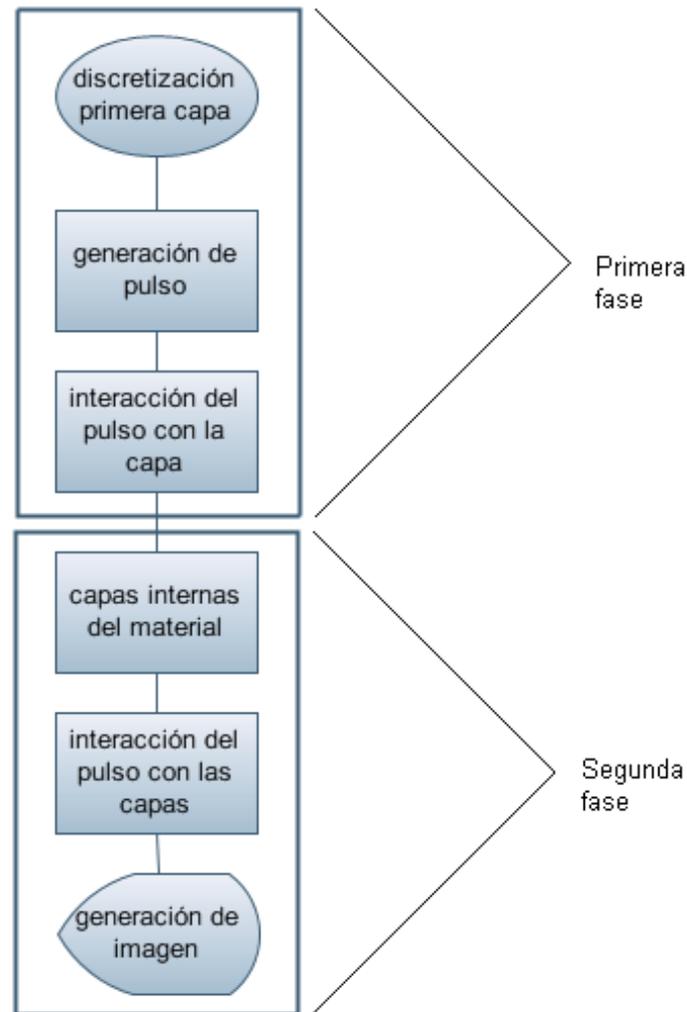


Figura 4.5 Esquema general

4.1.1. Procedimientos de la Primera Fase

La primera fase está compuesta por 3 procesos, el primero consiste en generar la primer capa del material, en el segundo proceso se genera el pulso ultrasónico y en el tercer proceso se generarán las interacciones del pulso con los elementos que se encuentren dentro de su campo visual, dichos elementos son los componentes

de la capa simulada del material, una vez que se tienen las interacciones de los objetos visibles para el transductor este se mueve de forma que vea el material en su totalidad.

Discretización del material

En análisis numérico los problemas continuos a veces tienen que ser sustituidos por problemas discretos cuya solución se conoce y se aproxima a la del problema continuo, a esto se le llama proceso de discretización. Por ejemplo, la solución de una ecuación diferencial es una función. Esta función debe estar representada por una cantidad limitada de datos, por ejemplo, su valor en un número finito de puntos en su dominio, a pesar de este dominio sea un continuo.

En este caso tenemos la superficie de interacción de material con el haz generado por el transductor, la cual tiene que ser discretizada para poder generar las interacciones entre el haz y el material, para hacer esta discretización se formó una malla, cuyos nodos tienen una separación muy pequeña, menor a la longitud de onda empleada.

Espacio donde se propaga la onda (el pulso)

El medio en donde se propaga las ondas se consideró como un medio homogéneo

Generación del pulso

La tasa o frecuencia de muestreo es el número de muestras por unidad de tiempo que se toman de una señal continua para producir una señal discreta, durante el proceso necesario para convertirla de analógica en digital.[19]

La duración del pulso puede ser calculada en base a la frecuencia de muestreo, conociendo cuantas muestras tiene el pulso completo

El teorema de muestreo de Nyquist-Shannon, es un teorema fundamental de la teoría de la información, de especial interés en las telecomunicaciones.

El teorema trata con el muestreo, que no debe ser confundido o asociado con la cuantificación, proceso que sigue al de muestreo en la digitalización de una señal y

que, al contrario del muestreo, no es reversible (se produce una pérdida de información en el proceso de cuantificación, incluso en el caso ideal teórico, que se traduce en una distorsión conocida como error o ruido de cuantificación y que establece un límite teórico superior a la relación señal-ruido).

El teorema demuestra que la reconstrucción exacta de una señal periódica continua en banda base a partir de sus muestras es matemáticamente posible si la señal está limitada en banda y la tasa de muestreo es superior al doble de su ancho de banda.

Dicho de otro modo, la información completa de la señal analógica original que cumple el criterio anterior está descrita por la serie total de muestras que resultaron del proceso de muestreo. No hay nada, por tanto, de la evolución de la señal entre muestras que no esté perfectamente definido por la serie total de muestras.[24]

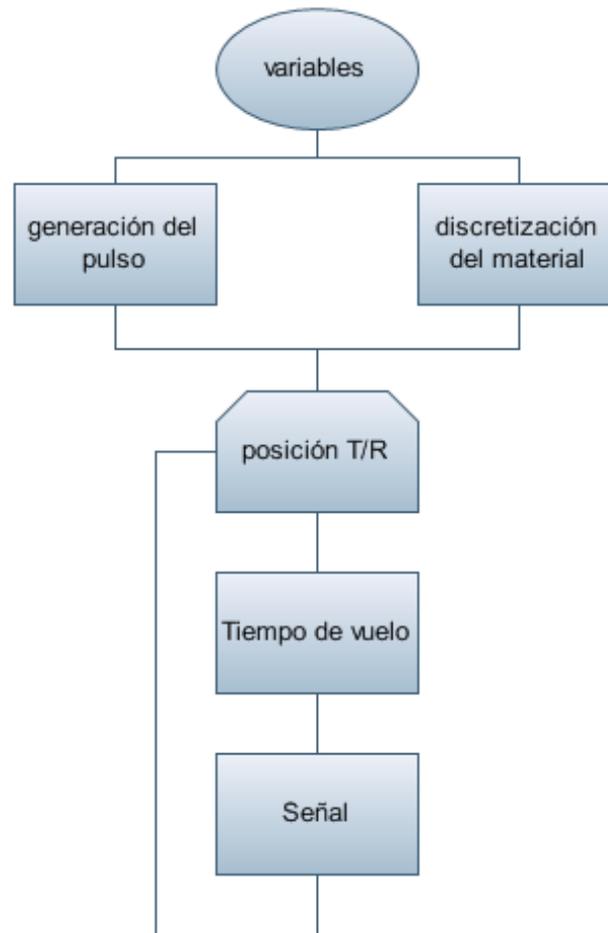


Figura 4.6 Primera fase

Los parámetros utilizados en el programa son los siguientes:

variables	Definición
f_s	Frecuencia de muestreo
esp_i	espesores
c_i	Velocidad de propagacion de la señal en el medio i
λ_i	Longitud de onda en el material
t_c	tiempo para completar dos longitudes de onda
f	Frecuencia del transductor
t_p	tiempo t_c discretizado
d	distancia recorrida por el pulso
$\lambda_1/2$	distancia del movimiento del T/R
$\lambda_1/8$	distancia entre dos puntos adyacentes del material discreto
$vent$	ventana

Formacion del Haz

El primer paso para la realización del programa es generar el pulso inicial del transductor como una función seno modulada por una campana Gaussiana (Hamming). Existen diversas campanas gaussianas, una de las mas utilizadas es la Hamming por la suavidad en que convergen sus polos. la ventana Hamming tiene una mejor selectividad, para señales amplias, pero tiene la desventaja que los lóbulos laterales son altos y de hecho se van bajando de 20 dB por octava, igual que los de una ventana rectangular.

- 1) Función seno, tiene una amplitud de A , una frecuencia ω , y tomaremos una

duración $t = 2 * \lambda/c$ para que complete dos longitudes de onda.

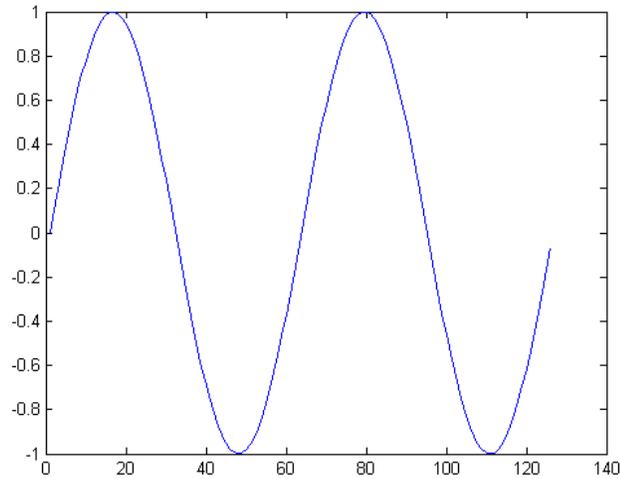


Figura 4.7 onda senoidal

```
t=0:deltat:2*tc;  
x=A*sin(2*pi*f*t);
```

tomando a t como un vector de longitud $2tc$, con incrementos de $1/f_s$

- 2) Posteriormente introducimos una campana Gaussiana definida por la ventana de Hamming para dar la forma deseada al pulso, la longitud de la campana es 2λ ya que se quiere producir un pulso de esta longitud.

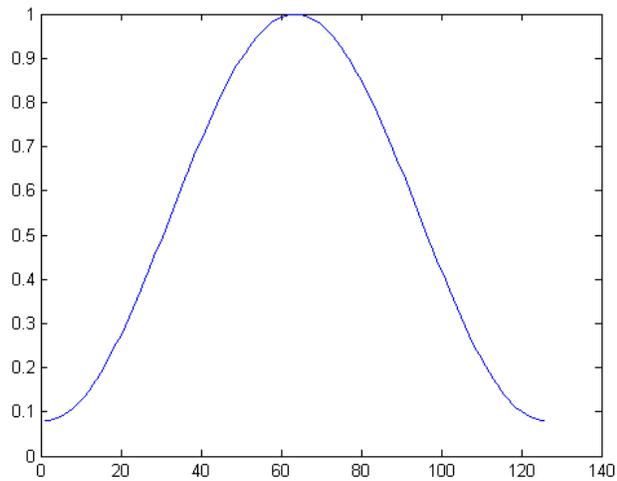


Figura 4.8 ventana de Hamming

```
tc=2*lambda/c;  
tp=ceil(tc*fs);  
vent=hamming(tp);
```

t_p = el tiempo discreto que tarda en completar dos oscilaciones completas

- 3) Multiplicando las dos funciones se obtiene un pulso sinusoidal de dos ciclos de duración cuya amplitud, como función del tiempo, es modulada por una Gaussiana. En la figura 4.9 se muestra la operación que se realiza para generar el pulso ultrasónico, en la figura 4.10 se muestra el pulso final y su espectro de Fourier donde se muestra que la frecuencia del transductor esta a 2,5 Mhz,

es posible utilizar cualquier otra frecuencia (figura 4.11).

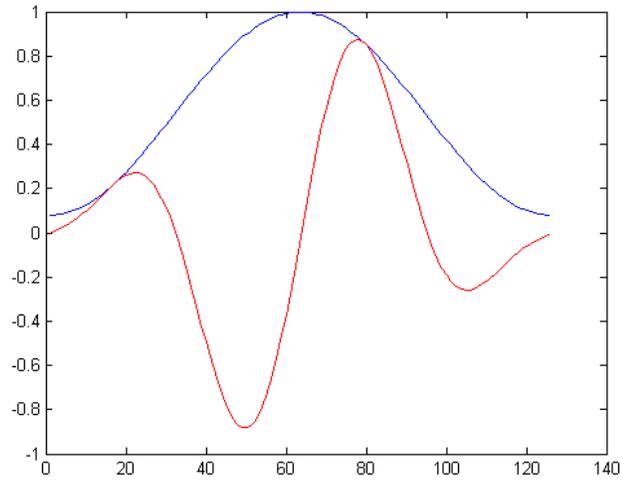


Figura 4.9 ventana de Hamming y senal senoidal

```
x=vent'.*sin(2*pi*f*t(1:length(vent)));
```

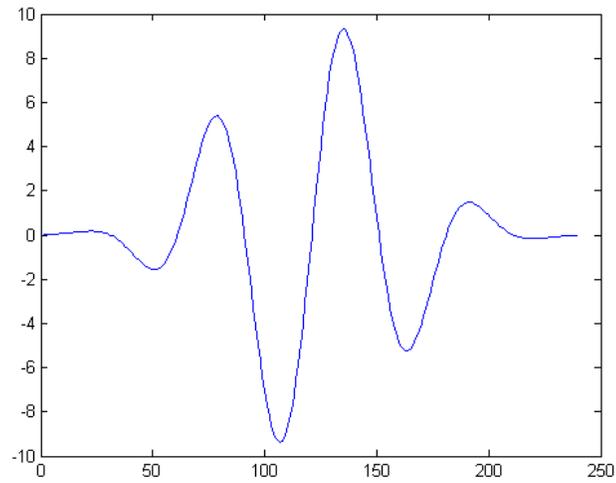


Figura 4.10 Pulso Ultrasonico

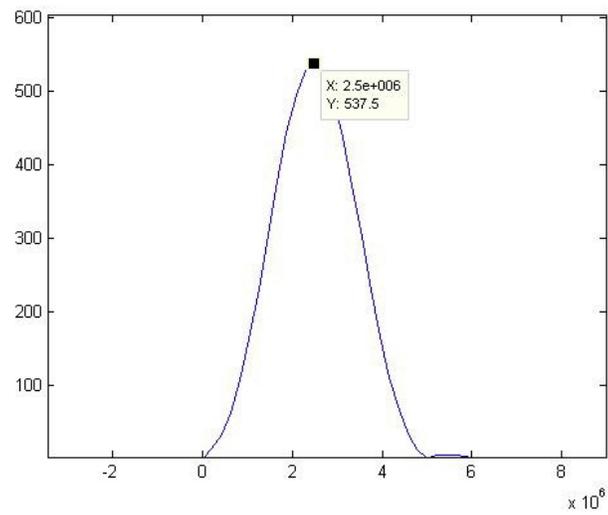


Figura 4.11 Transformada de Fourier del pulso

Simulación del material

Para simular el material es necesario discretizar la primer capa, por lo cual, se tomó un material de longitud arbitraria L , el material se dividió en muestras con separación de $\lambda/8$ para evitar la presencia de artefactos y para no consumir tanto tiempo en los cálculos; ya generadas las muestras se utilizarán posteriormente como fuentes puntuales (principio de Huygens), de cada capa se obtienen N muestras

$$N = \frac{8L}{\lambda} \quad (4.2)$$

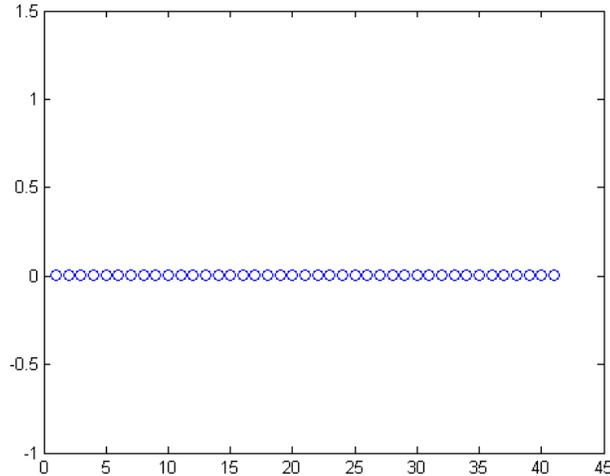


Figura 4.12 capa discretizada

```
rej=0*lambda1:lambda1/8:20*lambda1;
F2=[esp1*ones(size(rej')) rej'];
```

Una vez calculadas las posiciones de las fuentes puntuales e_{1i} , donde $i = 1, 2, \dots, N$ en donde N se puede calcular considerando el ángulo de la región visible del transductor y la distancia a la cual se encuentre el transductor de la muestra ($esp1$).

$$x = esp1 * \tan(\alpha) \quad (4.3)$$

$$N = x * 8/\lambda_1$$

Se calculan las distancias entre el T/R y se obtiene el tiempo de vuelo entre T/R y e_{1i} para generar los pulsos que representan los ecos de cada una de ellas (ver figura 4.14).

El tiempo de vuelo está dado por la ecuación ($t = 2 * esp_i / c_i$) y el número de muestras para su representación discreta es ($t_d = t * f_s$).

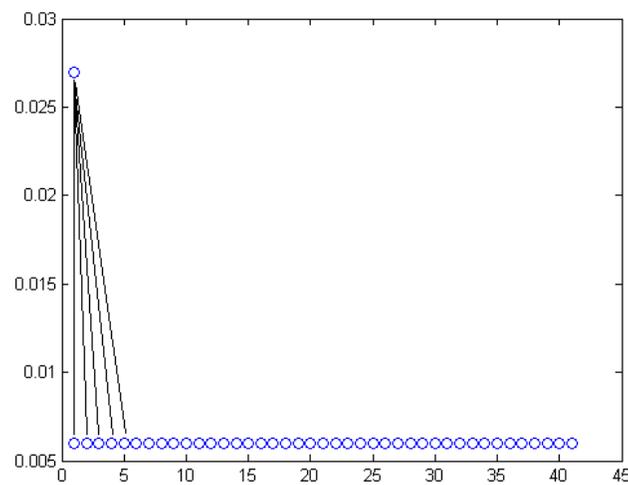


Figura 4.13 Interacción de un T/R con los T/R que están en su campo visual

Representación de las señales emitidas por las fuentes e_{1i}

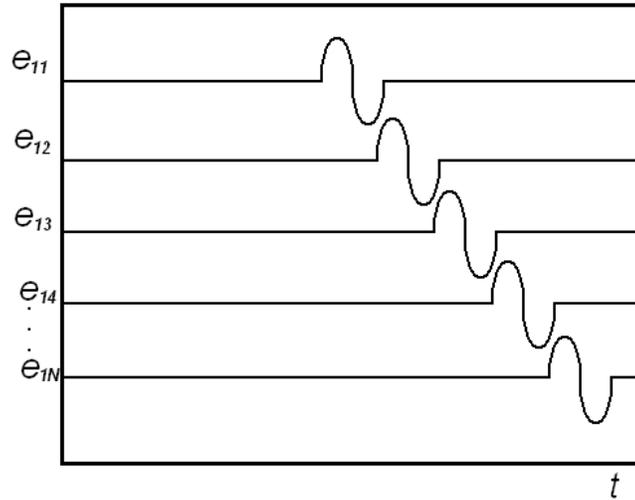


Figura 4.14 Esquema de las señales que llegan al transductor, estas se van retrasando por la mayor distancia a la que se encuentran

La amplitud que recibe cada fuente e_{1i} esta dada por A/N donde A es la amplitud original del pulso que emite T/R.

Este proceso se repite para cada posición del transductor que cambia de posición cada $\lambda/2$, y así se cubre todo el material multicapa en estudio. Generando una

primera imagen figura (4.16).

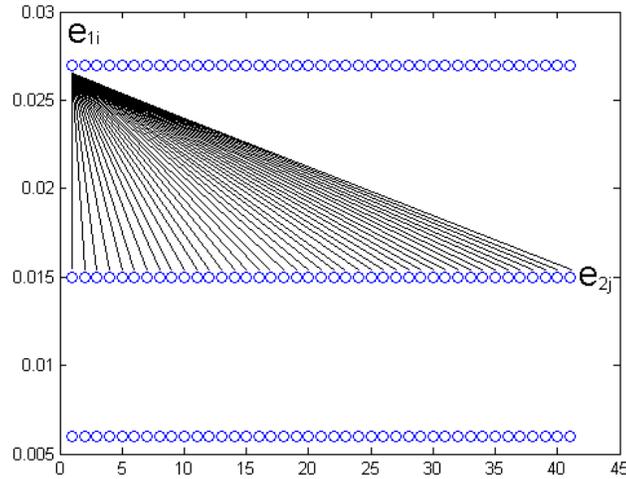


Figura 4.15 Campo visual dentro del material, al ser fuentes puntuales ven todo el material

Posteriormente se generaron las otras capas del material; cada capa se discretizó de igual forma que la capa anterior, esto es, se tomó una serie de puntos separados una distancia de $\lambda/8$. Originalmente se había pensado que para cada capa se creara una malla que dependiera de la longitud de onda en el medio ($\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$), esto originaba que en capas de mayor densidad la longitud de onda fuera mayor por lo que la separación entre las muestras aumentaba, lo que producía más ruido en el sistema, por esto, se decidió optar por una malla más fina utilizando para todas las capas la de menor longitud de onda (λ_1).

4.1.2. Procedimientos de la Segunda Fase

Se tiene que el material 1 iluminado una región A , va a iluminar toda la superficie del material 2 (ver figura 4.16) representado por M puntos sucesivos a una distancia

de $\lambda/8$ uno del otro.

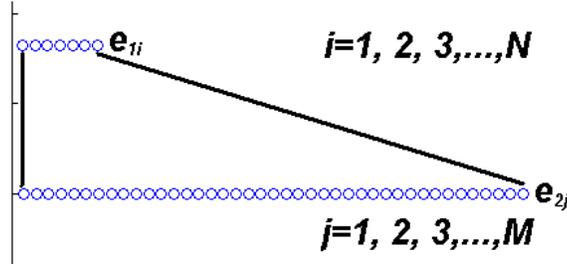


figura 4.16 Campo visual del transductor y las interacciones dentro del material

El número de puntos M es calculado como sigue:

$$M = \frac{8L}{\lambda_2} \quad (4.4)$$

el cual depende de la longitud total del medio 2.

Los ecos que se generan debido a que el punto e_{2j} es iluminado por e_{1i} se genera calculando el tiempo de vuelo entre e_{1i} y e_{2j} y la atenuación de la amplitud en la superficie 2 con

$$A_2 = \frac{A_0}{MN} \quad (4.5)$$

Teniendo ya discretizada la primer capa se iniciaron las interacciones ya dentro del material, utilizando el principio de Huygens, se consideró cada muestra como una fuente puntual, por lo tanto cada muestra de la capa anterior ve completamente la siguiente capa, esto ocurre para todas las muestras en todas las capas.

Este proceso se repite para cada posición del transductor y la información se concatena a la de la fase 1, en la figura 4.18 se muestra la discretización del material

de 3 capas

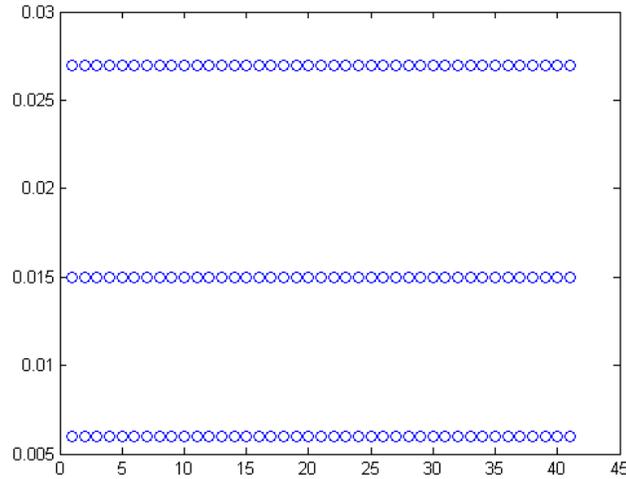


Figura 4.17 Esquema del material multi-capas discretizado

```
rej=0*lambda1:lambda1/8:20*lambda1;
F3=[(esp1+esp2)*ones(size(rej')) rej'];
F4=[(esp1+esp2+esp3)*ones(size(rej')) rej'];
```

En caso de que exista una tercera capa de otro material la fase 2 se repite.

Para la inclusión de defectos en la segunda capa del material se insertaron funciones, las cuales se discretizaron y se utilizaron en lugar de la segunda capa simulada anteriormente, se hicieron las interacciones utilizando esta nueva capa generada.

El algoritmo aquí descrito es una implementación de la que sucede fenomenológicamente, sin embargo no sigue la lógica del fenómeno mismo. Es decir, que el transductor en una posición específica recibe información de las capas que esta com-

puesto el material, en este algoritmo se dividieron en fases por capas del material.

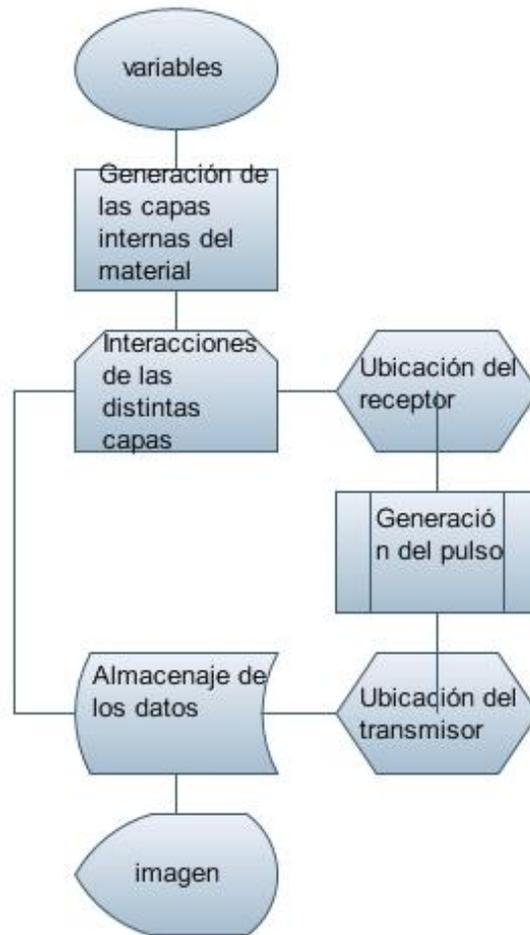


Figura 4.18 segunda fase

Obtenidas todas las fronteras discretizadas se hicieron las interacciones del haz con cada una de las fuentes puntuales en cada capa, para la primera capa se consideró el área visible del transductor, por lo cual solo se iluminó un cierto número de fuentes, estas fuentes iluminadas, al ser consideradas como fuentes puntuales, iluminan a su vez a todas las fuentes de la siguiente capa.

Se tomó cada fuente como ideal, es decir, que no absorbe energía, solo se consideró atenuación por distancia viajada.

Una vez generadas todas las interacciones de las capas obtenemos las imágenes de la simulación.

Capítulo 5

Resultados

A lo largo del presente trabajo se ha descrito el marco teórico y la forma de implementar un programa capaz de realizar la simulación del análisis de materiales multi-capas, este capítulo se divide en dos partes, en la primera, se muestran las imágenes obtenidas para materiales multi-capas cuyas capas tienen distintos espesores, con esto se puede ver cual es la mínima separación entre capas que puede distinguir el programa; en la segunda parte se introducen algunas irregularidades en la segunda capa del material, con las cuales se pretende simular fallas que puedan estar presentes en un material.

Parámetros de la simulación			
Frecuencia central del transductor	2,25Mhz		
Frecuencia de muestreo	3 * f		
Duración del pulso	0,8 μ s		
Dimensiones del material	$(20 * \lambda_1) * (10 * (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3))$		
Medio 1	$c_1 = 1500$	$\lambda_1 = c_1 * f = 0,0006$	$d_1 = 10 * \lambda_1$
Medio 2	$c_2 = 2250$	$\lambda_2 = c_2 * f = 0,0009$	$d_2 = 10 * \lambda_2$
Medio 3	$c_3 = 3000$	$\lambda_3 = c_3 * f = 0,0012$	$d_3 = 10 * \lambda_3$

Tabla 2- Parámetros de la simulación

5.1. Capas con distintos grosores

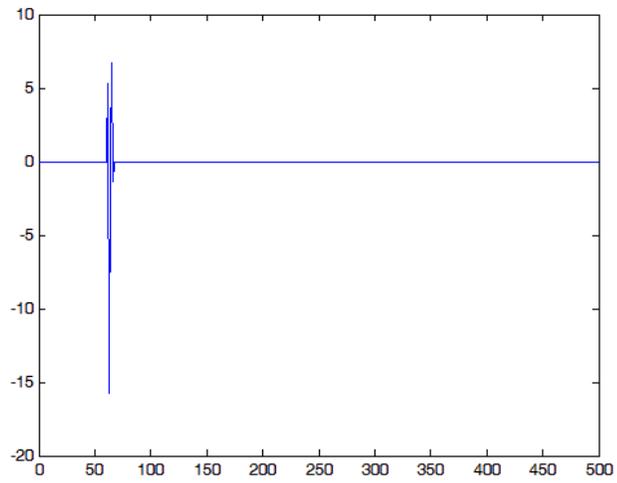


Figura 5.1 Senal procedente del transductor

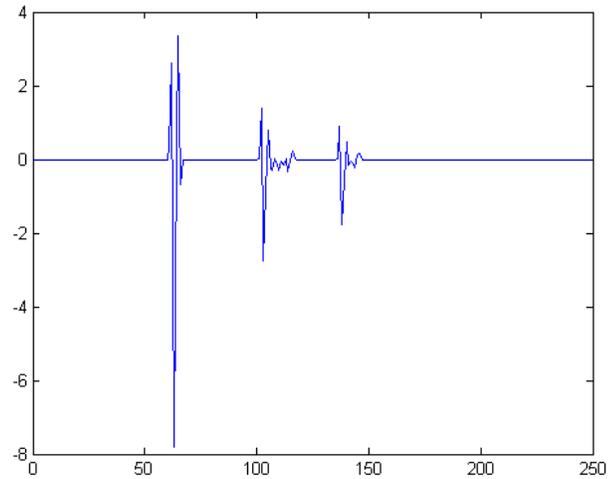


Figura 5.2 Interaccion del transductor con el material, se ven las tres capas que lo conforman

En la figura 5.1 se muestra la señal generada por el transductor en una posición, la señal sufre deformación por los dispersores que se encuentran en el medio, se utilizo una frecuencia de muestreo $f_s = 3f$, al sumar todas las señales del transductor

(figura 5.2) se obtiene la imagen de las tres capas del material.

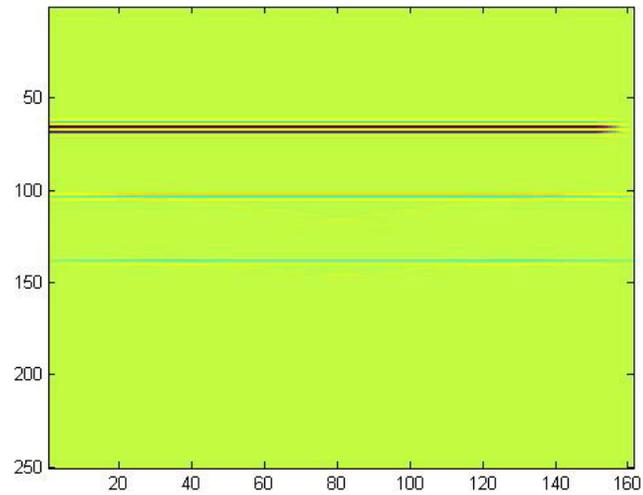


Figura 5.3 material multi-capa separadas $10\lambda_i$

Se observan las tres capas simuladas del material, puede notarse como disminuye la intensidad de las líneas, en este caso se tomaron las capas separadas $10\lambda_i$, esto es ($esp1 = 10\lambda_1$, $esp2 = 10\lambda_2$, $esp3 = 10\lambda_3$), las velocidades en cada capa fueron $c_1 = 1500m/s$, $c_2 = 2250m/s$, $c_3 = 3000m/s$ y $\lambda_1 = 6 * 10^{-4}m$, $\lambda_2 = 9 * 10^{-4}m$, $\lambda_3 = 1,2 * 10^{-3}m$

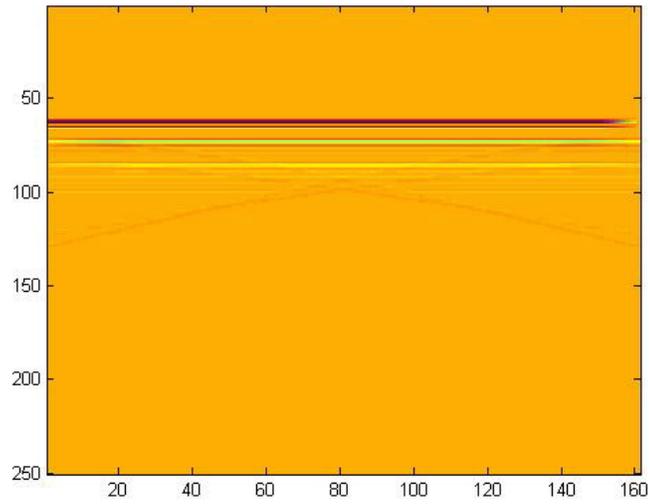


Figura 5.4 Separacion entre las capas de $5\lambda_i$

La resolución del sistema se define como la capacidad del sistema a resolver dos objetos cercanos. Se disminuye la separacion de las capas, para observar la mínima separación que puede resolver el sistema, el la figura 5.3 pueden verse todavia las

tres capas, estas se encuentran igualmente $esp1 = 5\lambda_1$, $esp2 = 5\lambda_2$, $esp3 = 5\lambda_3$.

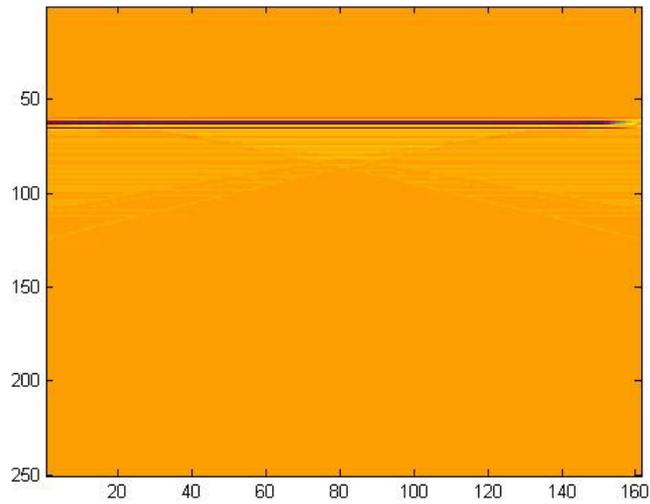


Figura 5.5 separacion entre las capas de $2\lambda_i$

En la figura 5.4 puede apreciarse como ya no es posible distinguir entre las capas del material, las capas están a una distancia de $2\lambda_i$, el sistema ya no puede diferenciar las separación de las capas, por lo tanto el límite de separación entre capas que puede distinguir el sistema es de $3\lambda_i$.

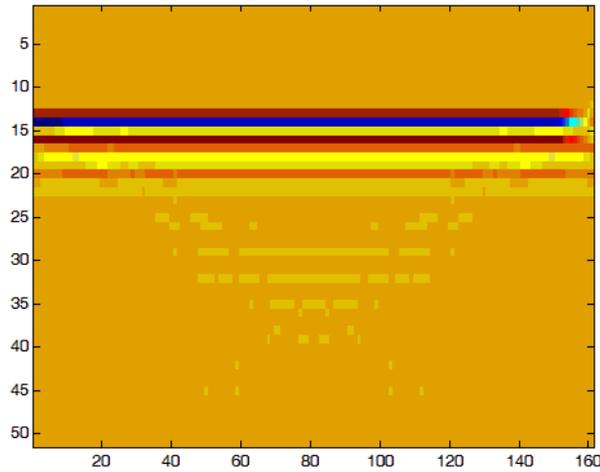


Figura 5.6 Acercamiento de las capas separadas $2\lambda_i$

En la figura 5.5 se muestra un acercamiento de la figura 5.4, se muestra como ya no es posible distinguir entre las distintas capas

5.2. Inhomogeneidades presentes en el material

Una aplicación importante de los END es poder ver fallas en los materiales, para simular estas fallas utilizamos algunas funciones (círculo, escalón y diente de sierra); las cuales son introducidas en la segunda capa del material.

Las fallas se muestran en las siguientes figuras, el análisis se enfocara en la circunferencia introducida en la Figura 5.6.

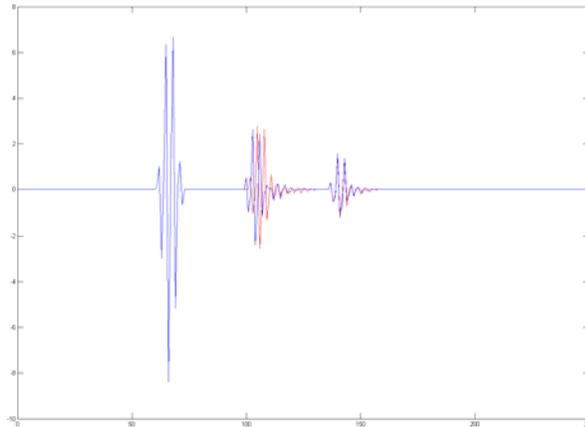


Figura 5.7 Señal obtenida del material sin defectos y con un escalon

en la figura 5.7 se muestra la señal del transductor de una superficie sin fallas en azul, en verde señal de una superficie con escalon, se observa que el eco del inicio del material y del final permanecen sin cambios, el eco de la segunda capa se recorre

y deforma por la presencia del escalón.



Figura 5.8 Material discretizado con un escalón

En la figura 5.8 se introdujo un escalón en la segunda capa

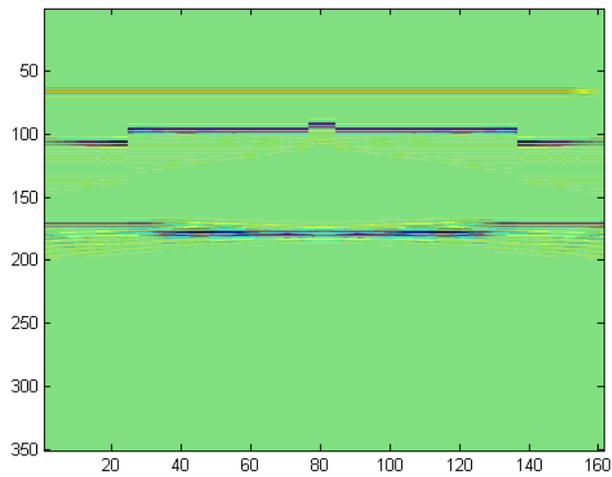


figura 5.9 Imagen obtenida de la capa con escalon

Imagen del escalón en la segunda capa, se puede ver en la última capa la existencia de fantasmas productos de las reflexiones así como una mayor intensidad en las orillas por encontrarse mas cercanas a la capa anterior

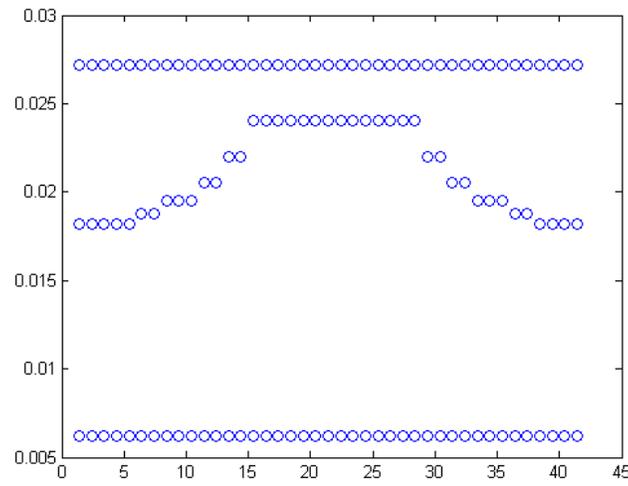


Figura 5.10 Material discretizado con una piramide en la segunda capa

En esta figura se simuló una piramide

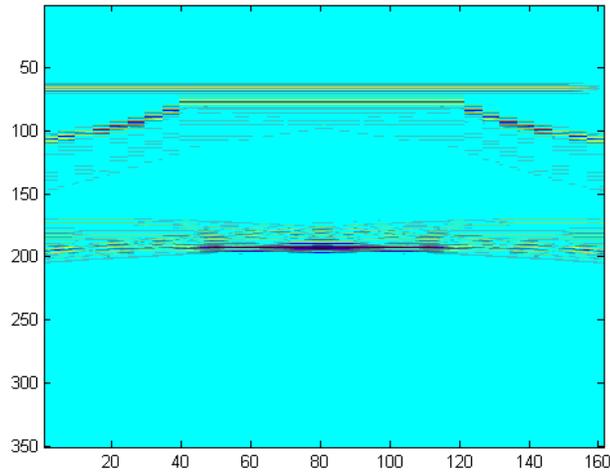


figura 5.11 Imagen obtenida de la piramide

Al igual que la figura 5.9 se pueden apreciar la presencia de fantasmas, en esta imagen aparecen con mayor intensidad por el mayor número de escalones presentes.



Figura 5.12 Escalera con incrementos de $\lambda/2$

Discretización del material con una escalera en la segunda capa

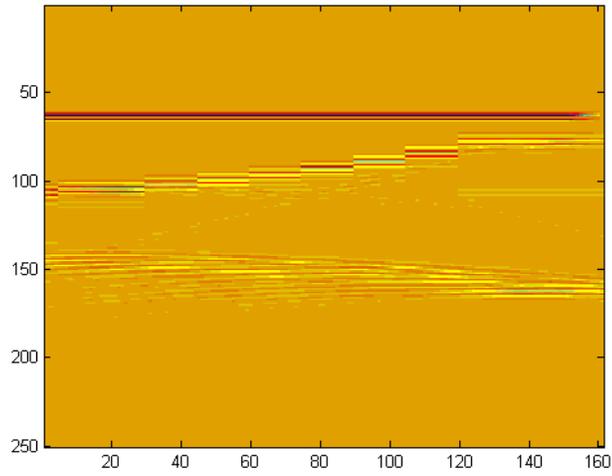


Figura 5.13 Imagen obtenida con una escalera en la segunda capa

Imagen obtenida de la escalera

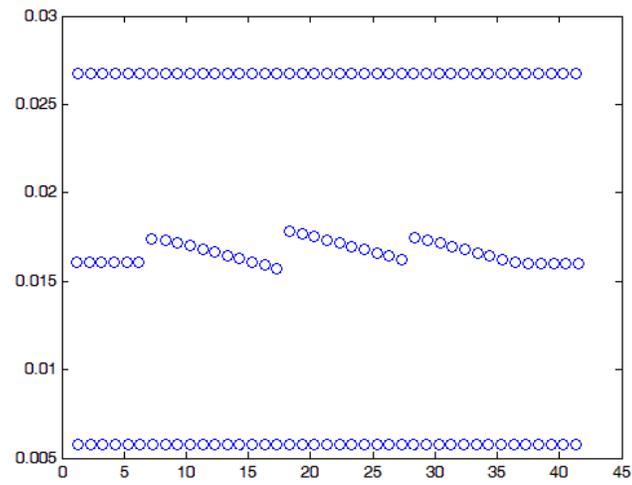


Figura 5.14 Diente de sierra en la segunda capa

En esta figura se simuló un diente de sierra

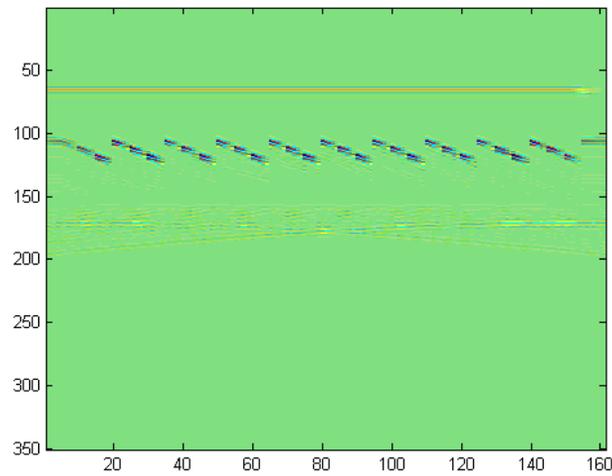


figura 5.15 Imagen obtenida del diente de sierra

En la imagen puede observarse en la última capa como por efecto del diente de sierra se observa muy destemplada

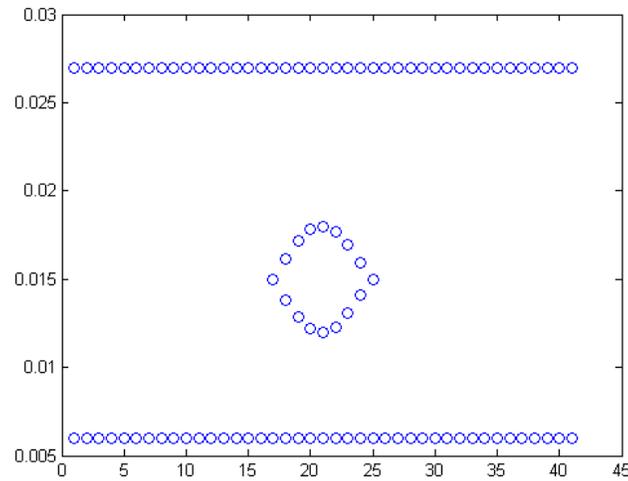


Figura 5.16 Circunferencia inmersa en el material

En la imagen 5.16 se muestra como se simuló un objeto circular dentro de nuestro

material

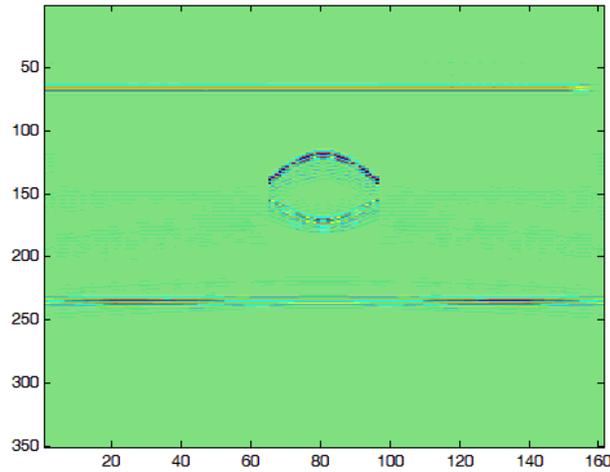


figura 5.17 Imagen obtenida de la circunferencia

En la figura 5.17 se observa una circunferencia dentro del material, se utilizo una velocidad de 2650 m/s para la velocidad del material circundante y para el material dentro de la circunferencia una velocidad de 6400 m/s, con esto se pretende simular un balín de aluminio dentro de resina epoxica. Una imagen similar a esta puede observarse en la figura 5.18 la cual es una imagen obtenida experimentalmente de un balín dentro de resina epóxica.

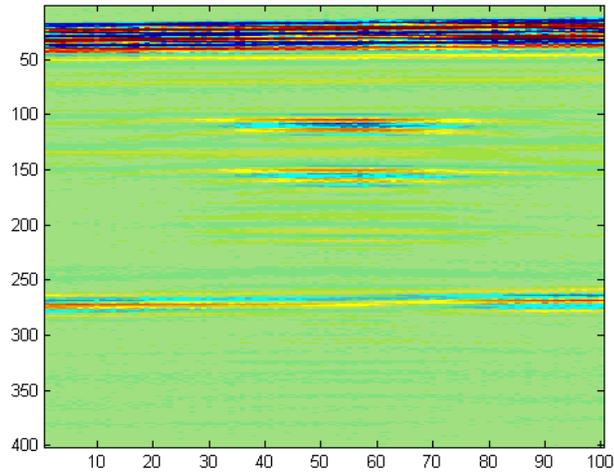


figura 5.18 Imagen experimental de un balin en epoxica

Imagen obtenida experimentalmente de un balín de aluminio dentro de una caja de resina epóxica.

5.3. Análisis

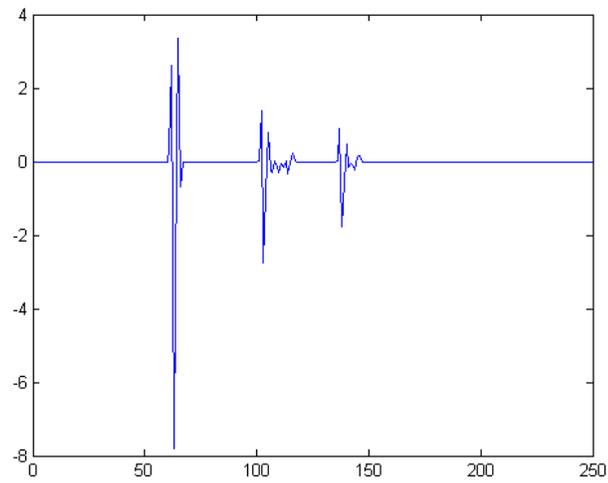


Figura 5.19 Señal obtenida del material multi-capa

Capas con separación de $10\lambda_i$ sin fallas presentes en ellas

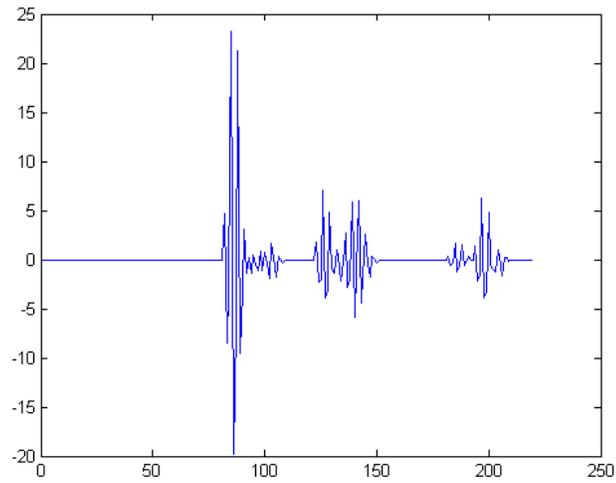


Figura 5.20 Senal del material con la circunferencia

Figura donde se muestran las señales provenientes de la circunferencia

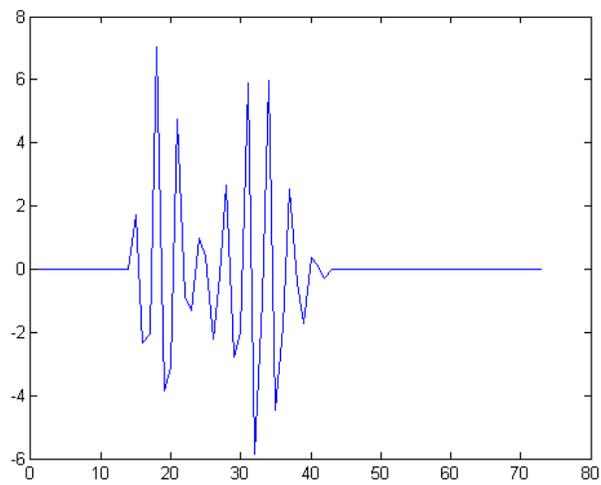


figura 5.21 Senales procedentes de balin

acercamiento en el que se pueden ver los ecos provenientes del balón.

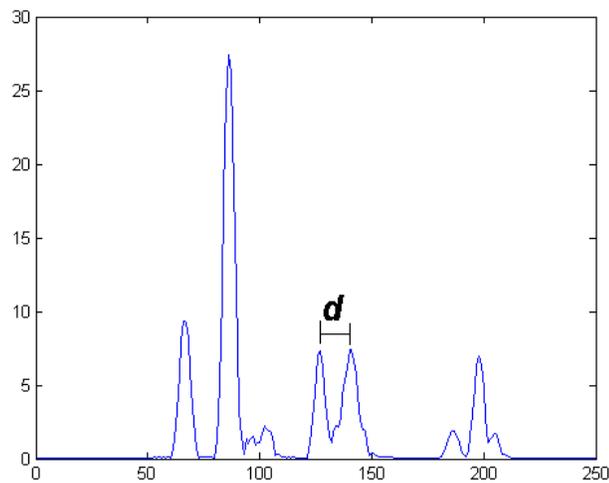


figura 5.22 Transformada de Hilbert de la figura 5.20

De esta figura podemos obtener el diámetro del círculo simulado, la distancia entre los dos picos de la figura 5.17 es de 16 muestras, la velocidad es $c = 6400 \text{ m/s}$ y la frecuencia de muestreo f_s es 7.5 Mhz, por lo tanto $d = 16 * c_2 / f_s = 0,013 \text{ m}$ lo cual da un diámetro del doble del círculo simulado esto es a causa del tiempo de vuelopor lo que obtenemos un diámetro. $d = 6,8 \pm 0,85 \text{ mm}$

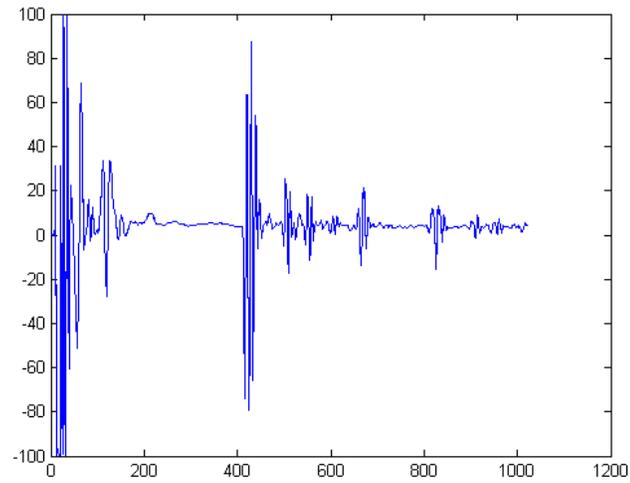


Figura 5.23 Senal experimental del balin en la epoxica

Señal obtenida experimentalmente

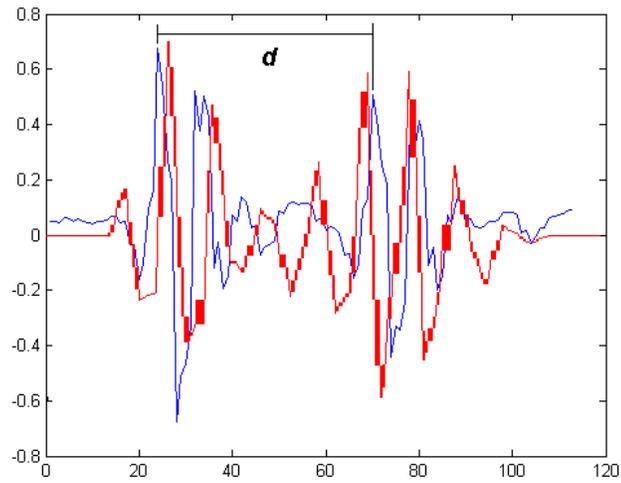


Figura 5.24 En rojo senales simuladas del balin, en azul senales experimentales

acercamiento de la señal, se observan los ecos producidos por el balín, en azul señal experimental, en rojo señal de la simulación

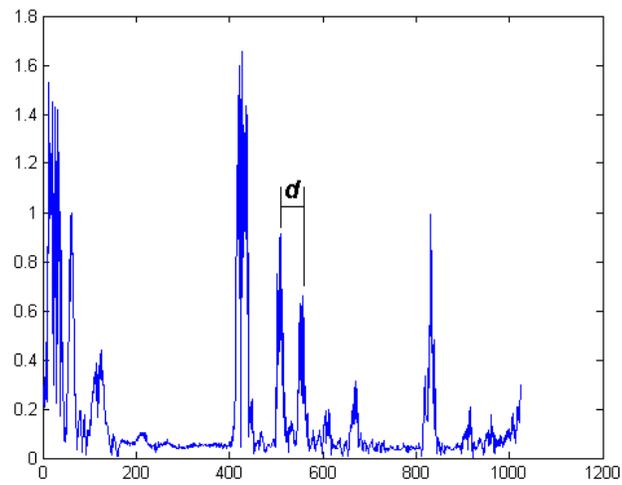


figura 5.25 Transformada de Hilbert de la figura 5.23

valor absoluto de la envolvente de la señal original

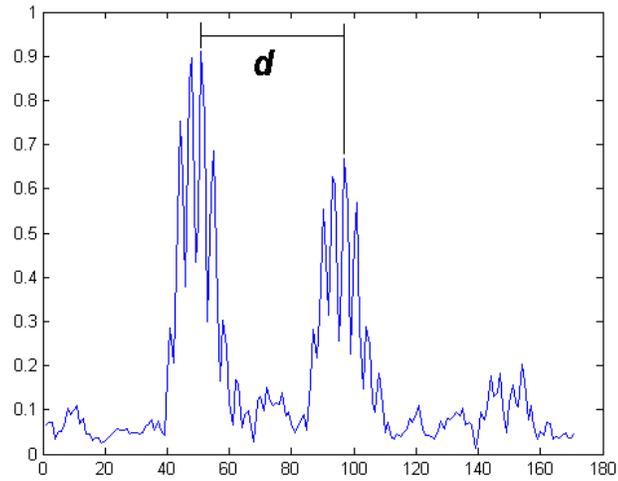


figura 5.26 Transformada de Hilbert de la señal
procedente del balin

En el experimento se utilizó un balín de aluminio, por lo que $c = 6400 \text{ m/s}$ y una frecuencia de muestreo $f_s = 20 \text{ Mhz}$, de la figura anterior podemos ver que hay 46 muestras por lo que $d = 46 * c/f_s = 0,014$ es decir, el balín tiene un diámetro $d = 7,36 \pm 0,32 \text{ mm}$

Capítulo 6

Conclusiones

El presente trabajo de tesis tiene como objetivo simular en la plataforma *MATLAB* imágenes acústicas de materiales multi-capas provenientes de END-UT empleando la técnica pulso-eco.

En la evaluación por ultrasonidos es importante implantar herramientas para el diagnóstico de fallas e imperfecciones en materiales. Estas herramientas deberán incluir procedimientos que puedan identificar y discriminar fallas y obtener la localización de estas. En este trabajo se propuso un algoritmo para simular los ensayos mediante la técnica pulso-eco con el cual se pueden observar y localizar fallas presentes en materiales. Para la validación del algoritmo se realizó un experimento en el que un balón de aluminio se encontraba inmerso en resina epoxica.

Para el diseño del algoritmo se tuvo que acondicionar el pulso para que sea similar al producido por un transductor ultrasónico, para esto, una señal sinusoidal se modulo con una ventana de Hamming, se utilizo esta ventana por la suavidad con que converge, se genero un pulso de dos longitudes de onda. Se simuló un material con una longitud de 20λ compuesto de 3 capas con una separación entre ellas de $10\lambda_i$, con i el número de capa, las cuales, fueron discretizadas para poder hacer las interacciones del pulso con el material, se vio que una rejilla con separación de $\lambda/8$ es suficiente para obtener una buena imagen del material. El número de operaciones que realiza la computadora es reducido ya que se esta considerando un modelo muy simple en donde cada punto de la malla interacciona con todos los puntos de la siguiente capa vía el pulso generado, considerando únicamente atenuación por

distancia viajada

Se determino que la menor separación que puede haber entre las capas de un material el de 3λ , esto es $1,8 * 10^{-3} m$.

Se pueden observar como las distintas fallas son fácilmente observables, con lo cual se muestra la capacidad de esta técnica para la detección y localización de fallas de distintas formas y tamaños, observamos en el caso del escalón que puede verse escalones con una altura inferior a $\lambda/2$, sin embargo en la practica es muy difícil ver escalones de estas dimensiones por las dispersiones y atenuaciones de los medios reales

Para verificar el algoritmo se calculó el diámetro de la circunferencia simulada en base al eco obtenido, se encontró que tiene un diámetro $d = 6,8 \pm 0,85 mm$, lo cual concuerda con la simulación, posteriormente se realizo un experimento en donde se analizo un balón inmerso en resina epoxica, el barrido se efectuó en toda la superficie de la resina, se muestra en la Figura (5.21) cuando se pasa por el centro del balón, se determino el diámetro del balón $d = 7,36 \pm 0,32 mm$, de esto podemos concluir que se pueden obtener mediciones con bastante precisión de los objetos a estudiar. En el experimento se pueden observar las sombras producidas por la parte superior e inferior del balón, en la simulación que se hace se puede ver la circunferencia completa por las limitantes tomadas (principio de Huygens) ya que las fuentes ven hacia todos lados. Al observar la siguiente capa se observan resultados similares en los datos obtenidos en el experimento y en la simulación, la imagen se ve atenuada en el centro por la presencia de la falla y se ve mas intensa en las orillas.

Hemos estudiado algunos de los aspectos fundamentales de los END-UT, se tiene considerado como trabajo a futuro un análisis de las señales obtenidas en el dominio de las frecuencias, esto podría aportar mayor información de las inhomogeneidades presentes en los materiales, por otro lado se validara el código para materiales muti-capas con capas de los espesores propuestos anteriormente.

Apéndice A

Codigo

```
\textbf{%Pulso
}
%
clear
f=2.5*10^6;
c1=1500;
c2=1.5*c1;
c3=2*c1;
c4=2.5*c1;
lambda1=c1/f;
lambda2=c2/f;
lambda3=c3/f;
lambda4=c4/f;
esp1=10*lambda1;
esp2=10*lambda2;
esp3=10*lambda3;
esp4=10*lambda4;
%
fs=3*f;
deltat=1/fs;
%
```

```
final=zeros(350,161);
mov=0;
e=0;
q=1;
b=1;
eval('call_inc')
eval('call_layer')
\textbf{%call_inc
}
%
while (mov<20*lambda1)
%
sen=1;
eval('inc');
dc=0;
b=b+1;
%
a=sum(suma');
final(1:350,q)=final(1:350,q)+a';
mov=mov+1*(lambda1)/8;
q=q+1;
a=0;
suma=zeros(350,length(rej));
end
\textbf{%inc.m
}
%Pulso incidente
F1=[0,0.000+mov];
rej=0*lambda1:lambda1/8:20*lambda1;
F2=[esp1*ones(size(rej')) rej'];
suma=zeros(350,length(rej));
%
```

```

eval(['sensor=F',num2str(sen),',';']);
[m n]=size(sensor);
eval(['fuen=F',num2str(sen+1),',';']);
[m1 n1]=size(fuen);
eval(['lambda=lambda',num2str(sen),',';']);
eval(['c=c',num2str(sen),',';']);

    for sen1=1:m,
        xsen=sensor(sen1,1);
        ysen=sensor(sen1,2);
        eval('beam');
    end
\textbf{%beam.m
}
%
tc=4*lambda/c;
tp=ceil(tc*fs);
t=0:deltat:2*tc;
vent=hamming(tp);
x=vent' .*sin(2*pi*f*t(1:length(vent)));

for rec=b:b+10,
    if rec<162
        xfuen=fuen(rec,1);
        yfuen=fuen(rec,2);
        d=sqrt((xsen-xfuen)^2+(ysen-yfuen)^2);
        d1(1,rec)=d;
        t1=ceil(2*d*fs/c);
        suma(t1:t1+tp-1,rec)=(suma(t1:t1+tp-1,rec)+x')+(x');
    end
    %
end
end

```

```

\textbf{%call_layer
}
}
%
dc=0;
eval('layer');
a=(suma);
final=final+a;
\textbf{%layer.m
}
%
sen=2;
rej=0*lambda1:lambda1/8:20*lambda1;
F3=[(esp1+esp2)*ones(size(rej')) rej'];
%*****circulo
r = 5*lambda1;
t1=linspace(0,pi,32);
z = r*cos(t1);
y = r*sin(t1);
cir=-sqrt(r^2 - z'.^2);
cir2=(esp1+esp2)+cir;
F3(65:length(rej)-65,1)=cir2;
%*****escalon
%F3(25:length(rej)-25,1)=F3(25:length(rej)-25,1)-(esp1/4);
%F3(77:length(rej)-77,1)=F3(77:length(rej)-77,1)-(esp1/10);
%*****piramide
%F3(5:length(rej)-5,1)=F3(5:length(rej)-5,1)-(esp1/20);
%F3(10:length(rej)-10,1)=F3(10:length(rej)-10,1)-(esp1/18);
%F3(15:length(rej)-15,1)=F3(15:length(rej)-15,1)-(esp1/16);
%F3(20:length(rej)-20,1)=F3(20:length(rej)-20,1)-(esp1/14);
%F3(25:length(rej)-25,1)=F3(25:length(rej)-25,1)-(esp1/12);
%F3(30:length(rej)-30,1)=F3(30:length(rej)-30,1)-(esp1/10);

```

```

%F3(35:length(rej)-35,1)=F3(35:length(rej)-35,1)-(esp1/8);
%F3(40:length(rej)-40,1)=F3(40:length(rej)-40,1)-(esp1/6);
%*****diente de sierra
  %e=0:lambda2/5:0.0026;
  %F3(5:19,1)=F3(5:19,1)+e';
  %F3(20:34,1)=F3(20:34,1)+e';
  %F3(35:49,1)=F3(35:49,1)+e';
  %F3(50:64,1)=F3(50:64,1)+e';
  %F3(65:79,1)=F3(65:79,1)+e';
  %F3(80:94,1)=F3(80:94,1)+e';
  %F3(95:109,1)=F3(95:109,1)+e';
  %F3(110:124,1)=F3(110:124,1)+e';
  %F3(125:139,1)=F3(125:139,1)+e';
  %F3(140:154,1)=F3(140:154,1)+e';
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
cir2=(esp1+esp2)-cir;
F4=[(esp1+esp2)*ones(size(rej')) rej'];
F4(65:length(rej)-65,1)=cir2;
F5=[(esp1+esp2+esp3)*ones(size(rej')) rej'];
rec=0;
d=0;
g=esp1;
while (sen<4)
    eval(['sensor=F',num2str(sen),',';]);
    [m n]=size(sensor);
    eval(['fuen=F',num2str(sen+1),',';]);
    [m1 n1]=size(fuen);
    eval(['lambda=lambda',num2str(sen),',';]);
    eval(['c=c',num2str(sen),',';]);
%
    for sen1=1:m,
        xsen=sensor(sen1,1);

```

```
        ysen=sensor(sen1,2);
        eval('beam2');
    end
    g=g+esp2;
sen=sen+1;
%
end
\textbf{%beam2.m
}
%
    tc=4*lambda/c;
    tp=ceil(tc*fs);
    t=0:deltat:2*tc;
    pulso_long=2*lambda*fs/c;
    vent=hamming(tp);
    if sen==4
        x=vent'.*sin(2*pi*f*t(1:length(vent)))*.3;
    else
x=vent'.*sin(2*pi*f*t(1:length(vent)));
    end
    rec=1;

for rec=1:m1,
    xfuen=fuen(rec,1);
    yfuen=fuen(rec,2);
    d=sqrt((xsen-xfuen)^2+(ysen-yfuen)^2);
    d=d+d1(sen1);
    d2(1,rec)=d;
    t2=ceil(2*d*fs/c);
    if (rec<65 ||rec>96)&& sen~=4
        suma(t2:t2+tp-1,rec)=suma(t2:t2+tp-1,rec)+(x'.3);
    else
```

```
        suma(t2:t2+tp-1,rec)=suma(t2:t2+tp-1,rec)+(x');  
    end  
  
end
```

Bibliografía

- [1] Ermert H., Harjes H.P, "Acoustical Imaging", 19 Plenum Press, 1991.
- [2] Raichel R. Daniel, The Science and Applications of Acoustics, Springer-Verlang, New York, 2000.
- [3] <http://www.ehu.es/acustica/>
- [4] Bacon, Sir Francis (Lord Verulam), The Works of Sir Francis Bacon, vol. 2, Spedding, J, Ellis, et al., London: Longman and Co., 1957.
- [5] Zagzebski, James A, Essentials of ultrasound physics, St. Louis ; Mexico : Mosby, c1996.
- [6] Galan, Andrej, Combined ultrasound methods of concrete testing, Amsteram ; elsevier, 1990.
- [7] Shutilov, Vladimir Aleksandrovich, Fundamental physics of ultrasound, New york ; paris : Gordon and breach, c1988.
- [8] Lempriere, Brian M, Ultrasound and elastic waves : frequently asked questions, Amsterdam : Academic, c2002.
- [9] Angelsen, Bjorn A. J, Ultrasound imaging : waves, signals, and signal processing, Norway : Emantec, 2000.
- [10] Abramov, Oles Vladimirovich, Ultrasound in liquid and solid metals, Boca raton, florida : CRC, c1994.
- [11] Beranek, Leo Leroy, Acoustics, New York : McGraw-Hill, 1954.
- [12] Paul Filippi, Acoustics : basic physics, theory, and methods, San Diego : Academic, c1999.

-
- [13] Pierce, Allan D., Acoustics : an introduction to its physical principles and applications, Woodbury, New York : Acoustical Society of America, 1994.
- [14] Brekhovskikh, L. M. (Leonid Maksimovich), Acoustics of layered media II : point sources and bounded beams, Berlin ; New York : Springer, c1999.
- [15] Beltzer, Abraham I., Acoustics of solids, Berlin : Springer, c1988.
- [16] Sen, S. N., Acoustics, waves and oscillations, New york, new york : Halsted, 1991.
- [17] Frank Fahy and John Walker, Advanced applications in acoustics, noise, and vibration, London : Spon Press, 2004.
- [18] Stumpf, Folden Burt, Analytical acoustics, Ann arbor, mich. : Ann arbor science, c1980.
- [19] Mark Kahrs, Karlheinz Brandenburg, Applications of digital signal processing to audio and acoustics, Boston : Kluwer, c1998.
- [20] Temkin, Samuel, Elements of acoustics, Estados Unidos : Acoustical Society of America, c2001.
- [21] Skudrzyk, Eugene J, The foundations of acoustics : Basic mathematics and basic acoustics, New york : Springer, 1971.
- [22] Fahy, Frank, Foundations of engineering acoustics, San Diego, California : Academic, 2001.
- [23] Lawrence e. kinsler, Fundamentals of acoustics, New york : J. Wiley, c2000.
- [24] Tohyama, Mikio, Fundamentals of acoustics signal processing, San Diego : Academic, c1998.
- [25] Bruce Lindsay, Robert, Physical acoustics, Stroudsburg, dowden : Hutchinson ross, 1974.
- [26] Conferencia, cong. International Symposium On Physical Acoustics (1990 : Kortrijk, Belgica), Physical acoustics : Fundamentals and applications / Ed. by oswald leroy and mack a. breazeale, New york : Plenum, c1991.
- [27] Mason, Warren Perry, Physical acoustics: Principles and methods, New York : Academic, 1964.

- [28] Seto, William W, Theory and problems of acoustics, New york ; mexico : McGraw-Hill, 1970.
- [29] Hunt, Frederick Vinton, Electroacoustics : The analysis of transduction, and its historical background, Published by the american institute of physics for the acoustical society of america, c1982.
- [30] Saposhkov, M. A., Electroacustica, Barcelona ; mexico : Reverte, c1983.
- [31] Lehmann, Rene, Les transducteurs electro et mecano-acoustiques : Haut-parleurs et microphones, Paris : Chiron, 1963.
- [32] R. N. Thurston, Allan D. Pierce, Ultrasonic instruments and devices : reference for modern instrumentation, techniques, and technology, San Diego : Academic, 1999.
- [33] NDT Resource Center, <http://www.ndt-ed.org>.
- [34] 15th World Conference on Nondestructive Testing <http://www.ndt.net/article/wcndt00/index.htm>
- [35] Solis M. Benítez H., Moreno E., González G., Leija L. "Location of Material Flaws Using Wavelets Analysis and Neural Network", IEEE International Ultrasonic Symposium, 1,841-844, 2002.
- [36] Solis M., Benítez-Pérez H., Rubio E., Medina-Gómez L., Moreno Hernández E. "Pattern Recognition of Wavelets Decomposition using ART2 Network for Echoes Analysis", IEEE International Ultrasonic Symposium, 1, 679-682, 2001.
- [37] Mucci R.A. "A Comparison of Efficient Beamforming Algorithms", "IEEE Trans. Acous. Speech Signal Processing, 32, 548-558, 1984
- [38] Johnson D.H., Dudgeon D.E., "Array Signal Processing", Prentice-Hall Inc, EUA, 1993.
- [39] Medina L., Wykes C., "A Composite Algorithm for 3D Ranging Airborne Ultrasonic", IEEE International Ultrasonic. Symposium", 1, 499-501, 2000.
- [40] Flandrin P., "Nondestructive evaluation in the time-frequency domain by means the Wigner-Ville Distribution", Signal Processing & Pattern Recognition in Nondestructive Evaluation of Materials", Springer-Verlag, 1988
- [41] Chen C. H., Guey J. C., "On the use of Wigner distribution in ultrasonic NDE", Review of Quantitative NDE, 11a, 967-974, 1991.

-
- [42] Medina L., Rubio E., "Wigner-Ville Distribution Enhancement for 2D-flaws Location", IEEE International Ultrasonic. Symposium, 2, 1380-1383, 2003.
- [43] Legendre S., Goyette J., Massicotte D., "Últrasonic NDE of Composite material Structures using Wavelet Coefficients", NDT&E International", 34, 31-37, 2001.
- [44] Benítez Pérez H., Rubio E., Medina L., García Nocetti F., "A Bessel Time Frequency Distribution and ART2 Network approach in Non Destructive Evaluation", World Congress of Ultrasound, 729-732, 2003.
- [45] Carlin B. "Últrasonica", URMO, España, 1979
- [46] Gomez-Ullate L., "Procesamiento Digital de Señales Ultrasónicas en END", I Jornadas Iberoamericas de Ultrasonido, 1998.
- [47] Panametrics Inc., "technical Notes: transducers", <http://www.panametrics.com>.
- [48] Cheeke D., "Fundamentals and Applications of Ultrasonics Waves", CRC Press, EUA, 2002.
- [49] Kinsler L., Frey A.R., Coppens A.B., Sanders J.B., "Fundamentals of Acoustics", 2nd John Wiley & Sons, EUA, 1982.
- [50] Blackstock D. T., "Fundamentals of Physicals Acoustics", John Wiley & Sons, EUA, 2000.
- [51] Kino G., "Acoustic Waves: Devices, Imaging and Analog Signals Processing", Prentice-Hall Inc, EUA, 1987
- [52] "Physical Acoustics", Branko Celler, Biomedical Systems Laboratory, University of NSW, Australia, 23rd June 1993.
- [53] "Applications of Acoustics", Mobile Computing Products Division of Advanced Micro Devices, Inc.
- [54] "Ultrasonic Bioinstrumentation", Mobile Computing Products Division of Advanced Micro Devices, Inc.