

Fundamentos teórico-prácticos del ultrasonido

Theoretical-Practical Basis of Ultrasound

JAIRO ALEJANDRO MARTÍNEZ RODRÍGUEZ

Físico de la Universidad Nacional de Colombia y Magíster en Ingeniería de Telecomunicaciones de la Universidad Politécnica de Valencia. Estudiante del Doctorado en Ingeniería de Telecomunicaciones de la Universidad Politécnica de Valencia. Director del grupo de investigación *Tecnologías Ultrasonicas* de la Universidad Santo Tomás, clasificado por Colciencias (Colombia) en categoría B.

jairorodriguez@correo.usta.edu.co

JAIME VITOLA OYAGA

Ingeniero Electrónico de la Universidad Santo Tomás. Especialista en Instrumentación Electrónica de la Universidad Santo Tomás y candidato a Magíster en Teleinformática de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Integrante del grupo de investigación *Tecnologías Ultrasonicas* de la Universidad Santo Tomás, clasificado por Colciencias (Colombia) en categoría B.

jaimevitola@correo.usta.edu.co

SUSANA DEL PILAR SANDOVAL CANTOR

Ingeniera Mecánica de la Universidad Santo Tomás. Integrante del grupo de investigación *Tecnologías Ultrasonicas* de la Universidad Santo Tomás, clasificado por Colciencias (Colombia) en categoría B.

susanasandoval@correo.usta.edu.co

Clasificación del artículo: revisión

Fecha de recepción: 21 de septiembre de 2006

Fecha de aceptación: 30 de abril de 2007

Palabras clave: efecto piezoeléctrico, transductores, sistemas ultrasonicos, ultrasonido.

Key words: piezoelectric effect, transducers, ultrasonic system, ultrasound.

RESUMEN

Diferentes tecnologías se basan en ultrasonido. En el presente artículo se hace una revisión conceptual de diversos aspectos básicos que deben ser comprendidos por cualquier persona que desee incursionar en este campo. La piezoelectricidad, los transductores piezoeléctricos, su caracterización eléctrica y campo acústico, la física del ultrasonido, su generación y recepción y, finalmente, algunas aplicaciones constituyen la temática que

se abordará en este documento. Se trata del primer de producto obtenido en el marco del proyecto de investigación *Diseño y construcción de un sistema ultrasonico para la detección de discontinuidades en soldaduras*¹.

¹ Proyecto aprobado en la convocatoria interna de la Universidad Santo Tomás de Bogotá.

ABSTRACT

Different technologies rely on ultrasonic. Through this paper we expect that readers can understand different basic concepts in order to deep in this field. Piezoelectricity, piezoelectric transducers, its electric characteristics and acoustic field, the ultrasonic

physics, generation and reception and, finally, some applications are the topics that we will develop in this document. This paper is the first academic product obtained within the framework of the research project *Desing and buiding of an ultrasonic system to detect discontinuities in soldiering*.

* * *

1. Introducción

Las aplicaciones tecnológicas del ultrasonido son numerosas: medición de distancias [1-3], espesores [4], control de procesos y calidad en la industria [5], evaluación no invasiva en medicina [6], detección de defectos en hormigón [7] y en soldaduras [8], sondeo del lecho marítimo y control de cardúmenes en biología marina [9], reconocimiento de objetos [10-11], localización de piezas arqueológicas [12], ensayos no destructivos en metales [13] y simulación de procesos [14] son algunas de ellas. El ultrasonido también ofrece una valiosa herramienta pedagógica en la enseñanza de las leyes físicas de las ondas [15-17], en las áreas de robótica [18], inteligencia y sistemas expertos [19] y control de vibración en estructuras civiles [20]. En la mayoría de las aplicaciones descritas subyace un área con abundante terreno fértil y en pleno desarrollo, el Procesamiento Digital de Señales Ultrasonicas (PDSU) que suministra técnicas que facilitan el estudio y la implementación de algoritmos que desempeñan un rol fundamental en cuanto a la interpretación correcta de las señales e imágenes obtenidas [21-25].

2. Antecedentes e historia

Las señales ultrasónicas con aplicaciones industriales y médicas tienen sus raíces en la naturaleza. En 1779 el biólogo L. Spallanzani descubre esta clase de ondas asociadas a la actividad de caza de los murciélagos [26]. Posteriormente, la atención se centró en la interacción de las ondas ultrasónicas con los objetos, lo que hizo que se destacaran ciertos hechos fundamentales: cuando esta interacción acontecía parte de la onda se absorbía y otra se reflejaba. Cuando se inspeccionó la señal reflejada se comenzaron a notar ciertas propiedades que han sido fuente de información para la medición de

diversas características físicas de los materiales. En 1842 el físico A. Doppler notó un efecto particular en el cambio de la frecuencia emitida por una fuente sonora; este efecto (denominado Doppler) se presenta cuando fuente y observador se desplazan en movimiento relativo [26].

El descubrimiento del efecto piezoeléctrico en Francia a finales del siglo XIX hizo viable la generación y detección de este tipo de ondas y se constituyó en fuente de inspiración para la búsqueda de aplicaciones. Como consecuencia, a principios del siglo XX el físico francés P. Langevin y el Dr. C. Chilowsky lograron desarrollar el primer generador ultrasónico por medio de un piezoeléctrico; este instrumento gozó de gran popularidad en el ámbito militar por sus numerosas aplicaciones durante la Segunda Guerra Mundial: el *Sonar* (acrónimo de la denominación inglesa *Sound Navigation Ranging*) o exploración acústica en navegación cuya patente fue obtenida por los gobiernos francés y estadounidense en 1916 y 1917, respectivamente [27-28]. En 1924 el científico ruso S. Y. Sokolov propuso el uso del ultrasonido como mecanismo válido para la inspección industrial, particularmente para la búsqueda de defectos [29-30].

También deben señalarse los adelantos logrados por F. Firestone, quien hacia 1940 desarrolló un equipo de inspección que utilizaba un solo *palpador*² como emisor y receptor, desde entonces, esto impulsó la técnica de pulso-eco [31]. Los anteriores instrumentos siguieron su proceso de desarrollo y alcanzaron cada vez mejores especificaciones y horizontes de aplicación más amplios. Entre

² El término "palpador" es un vocablo muy utilizado en el argot de los ensayos no destructivos con ultrasonido (END).

el grupo de investigadores contribuyentes cabe destacar a los hermanos de ascendencia alemana J. y H. Krautkramer, de cuyo trabajo surgió una las principales compañías en el ámbito mundial de equipos de inspección ultrasónica para aplicativos industriales [31-32].

El desarrollo de las tecnologías ultrasónicas ha sido de gran utilidad, dado que ellas poseen características muy convenientes. Por ejemplo: el ultrasonido permite lograr longitudes de onda cortas; esto trae una serie de ventajas, entre ellas se puede destacar su capacidad de penetración. Además, la difracción de estas ondas en torno a un objeto es menor y pueden propagarse prácticamente por cualquier material, incluso a través de tejidos biológicos. Estas notables cualidades posibilitaron tres grandes caminos de desarrollo en los ámbitos de la medicina, industrial y militar.

En el campo médico la tecnología ha tenido influencia simultánea en dos aspectos: a nivel terapéutico y como ayuda en diagnóstico. Desde la Edad Media se utilizaban ondas sonoras en el tratamiento de enfermedades neurológicas [33]. Actualmente, existe gran variedad de equipos para el tratamiento de afecciones de distinta índole. De igual manera y no menos importante, es el portafolio de aplicaciones como apoyo en diagnóstico, entre los cuales el más reconocido es la ecografía.

En cuanto al campo industrial se ofrecen soluciones para diversas tareas; especialmente, se encuentran dos grandes vertientes: equipos para procesos y equipos de inspección. Con respecto a esto deben mencionarse un conjunto de técnicas ultrasónicas

–además de las ya citadas en la introducción– como: limpieza de material industrial, detección de fugas en gran variedad de ambientes, sondeo y búsqueda de anomalías eléctricas, soldadura ultrasónica de plásticos y metales, y ensayos no destructivos para determinar la calidad de soldaduras [34-37].

3. Piezoelectricidad

Ciertos cristales como el cuarzo (SiO_2) o el titanato de bario (BaTiO_3) se polarizan eléctricamente cuando se someten a esfuerzos mecánicos de compresión y viceversa. Esto significa que al aplicarles un campo eléctrico oscilante experimentarán vibraciones mecánicas; si ellas coinciden con su frecuencia de vibración propia, resultarán de notable amplitud como consecuencia de la resonancia. Se denominó *efecto piezoeléctrico directo* al primero descubierto por P. y J. Curie en 1880; *efecto inverso* al segundo descubierto por F. A. Lippman en 1881, y *piezoeléctricos* a los materiales que los exhiben.

También es posible producir ultrasonido mediante el efecto magnetostrictivo. Este fenómeno lo presentan los materiales ferromagnéticos los cuales, bajo la acción de un campo magnético experimentan variaciones en sus dimensiones: alargamiento en la dirección longitudinal y contracción en la transversal. Sin embargo, la piezoelectricidad es la técnica más difundida para generar ultrasonido. En ausencia de un gradiente eléctrico las moléculas en un sólido piezoeléctrico estarán orientadas al azar; pero bajo la acción de un voltaje éstas tenderán a alinearse en la dirección del campo, con lo que se producirá una variación en el espesor del material. En la figura 1 se explican los detalles.

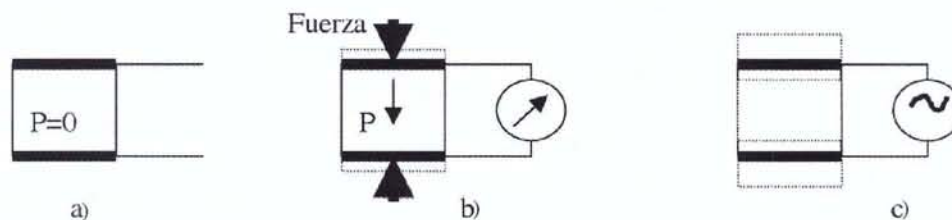


Figura 1. a) Cristal sin esfuerzo mecánico ni eléctrico y, por tanto, sin polarización. b) Como consecuencia del campo eléctrico aparece polarización y en un voltímetro se registra una diferencia de potencial. c) Aplicación de un campo eléctrico oscilante al cristal que origina su vibración mecánica. Fuente: adaptado de [38].

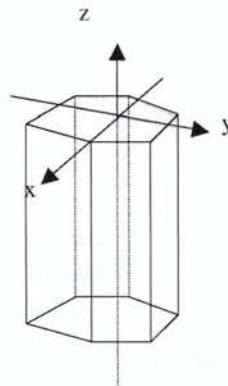


Figura 2. Ilustración de la dirección de corte en un cristal de cuarzo, típico para aplicaciones ultrasónicas

Cuando se aplica presión mecánica en forma perpendicular al eje de las x (figura 2) se obtendrán variaciones sumamente rápidas del espesor y, por ende, se generarán señales eléctricas; si por el contrario, se aplican cargas eléctricas a las caras perpendiculares al mismo eje se producirán variaciones de espesor. Si las cargas eléctricas son alternativas, el cristal vibrará a una frecuencia

definida por la relación existente entre su espesor y la longitud de onda.

Sólo ciertos cristales presentan efecto piezoeléctrico, pues el fenómeno requiere de una estructura cristalina especial: no tener centro de simetría. Para explicar esto puede suponerse que se realiza un corte transversal en el cristal de la figura 2 y se examina una de sus celdas unitarias.

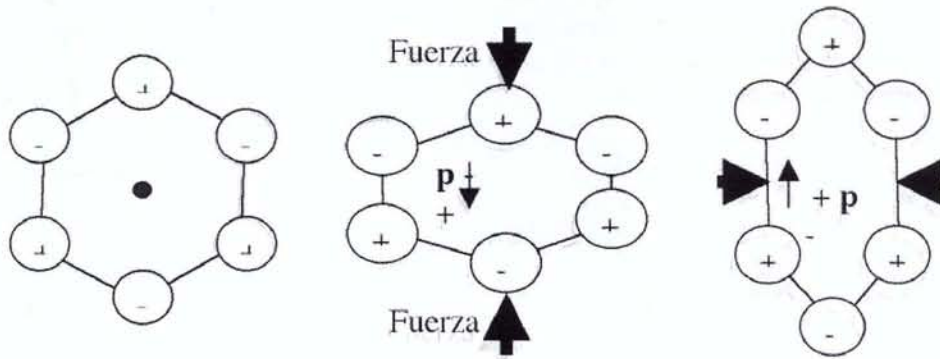


Figura 3. La celda unitaria hexagonal no tiene centro de simetría. Sin esfuerzo aplicado los centros de masa de la carga negativa y de la carga positiva coinciden. a) Cuando se aplica una fuerza los centros de masa ya no coinciden y aparece un momento de dipolo. b) Si ahora se aplica una fuerza en otro plano cristalino, la polarización de los dipolos cambia de sentido, pero no de dirección. Fuente: adaptado de [38]

En la figura 3 se considera que si el cristal es cuarzo los enlaces entre los motivos cristalinos (iones de silicio y oxígeno) formarán una celda unitaria hexagonal. Si en la primera figura se trazan líneas que unan los iones negativos se obtendrá un triángulo equilátero; por otra parte, si se repite el mismo

procedimiento –pero ahora con los iones positivos– se vuelve a obtener un triángulo equilátero. En conclusión, se notará que los baricentros de ambos triángulos coinciden, luego los centros de masa de los iones negativos y positivos también lo harán.

Si se realizan procedimientos semejantes en las figuras 3b y 3c, que representan al cristal sometido a cargas mecánicas, sin dificultad se notará que los baricentros ahora no coinciden en ambos casos; por tanto, los centros de masa iónica tampoco lo harán y como consecuencia se originan momentos de dipolo. Cuando se aplica la fuerza verticalmente, la polarización se induce en la misma dirección; sin embargo, al aplicarla en dirección horizontal la polarización inducida sigue presentándose en dirección vertical. En general, un esfuerzo aplicado en una cierta dirección puede dar origen a una polarización de los dipolos en otras direcciones cristalinas [38].

4. Transductores piezoeléctricos

El término *transductor* se refiere a cualquier dispositivo que transforme una forma de energía en otra. En particular –y teniendo en cuenta lo señalado en la sección anterior– si se contara con dos transductores sería posible disponer de un enlace ultrasónico: un transductor que convierta energía mecánica en eléctrica y otro que realice el proceso inverso. Para señales pequeñas el siguiente conjunto de relaciones es una aproximación aceptable que representa esos comportamientos electromecánicos [39]:

$$\begin{aligned}
 P &= \varepsilon^T E + dT & P &= \varepsilon^S E + eS \\
 S &= s^T T + dE & T &= c^E S - eE \\
 E &= \beta_T P - gT & E &= \beta^S P - hS \\
 S &= s^P T + gP & T &= c^P S - hP
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

En (1) ε y β son constantes dieléctricas; d , g , e y h ; constantes piezoeléctricas, y s y c constantes elásticas. E y P representan el campo eléctrico y la polarización y, por tanto, son magnitudes vectoriales; T y S son propiedades mecánicas, pero de carácter tensorial; es decir, son matrices que poseen seis componentes y no tres, como los vectores.

Si se considera el efecto piezoeléctrico directo bajo condiciones de campo eléctrico nulo, en (1) se obtiene:

$$P_i = d_{ij} T_j \tag{2}$$

Para el efecto inverso, sin aplicar ningún esfuerzo sobre la oblea se reduce a:

$$S_i = d_{ij} E_j \tag{3}$$

En (2) y (3) los coeficientes d_{ij} dependen del material de la oblea; por ejemplo: $2,3 \times 10^{-12} \text{ m/V}$ para el cuarzo, en el cual ocurre de modo natural el efecto piezoeléctrico¹. Una vez se ha elegido el material piezoeléctrico, sobre éste y al vacío se depositan películas metálicas que se constituyen en los electrodos del transductor.

Las dimensiones de la oblea se eligen de modo que ésta resuene mecánicamente a la frecuencia de la señal ultrasónica buscada:

$$F_n = \frac{c}{2L} \tag{4}$$

En (4), c es la velocidad del ultrasonido a través de la oblea² y L su espesor. La frecuencia de resonancia está determinada por este último; así, si el espesor de una oblea mide 0,5 mm ésta resonará a razón de 5 MHz.

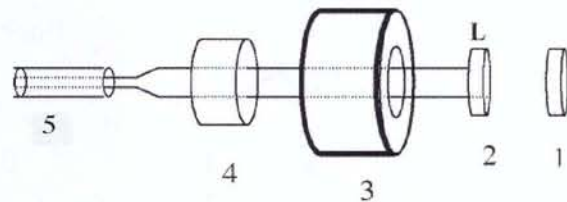


Figura 4. Partes constituyentes de un transductor. Fuente: adaptado de [40]

- 1) Capa de adaptación de impedancias.
- 2) Oblea piezoeléctrica.
- 3) Carcasa metálica o de acrílico.
- 4) Material de respaldo para proveer amortiguamiento a la oblea.
- 5) Cable coaxial

¹ Los cristales de cuarzo se usan ampliamente en circuitos oscilantes para generar señales de frecuencia muy estables. Sin embargo, en ultrasonido no son muy eficientes. En cambio, muchos transductores se fabrican con materiales policristalinos artificiales como el Titanato de Circonio (PZT), particularmente eficiente para la generación de ultrasonido.

² Estas velocidades están en un rango alrededor de 5.000m/s para la mayoría de materiales piezoeléctricos.

En la figura 4 se muestran los componentes de un transductor típico. Además de la oblea piezoeléctrica (2), en la cara posterior de ésta se ensambla un material de elevado amortiguamiento acústico (4) que es conocido como *backing* y el cual permite controlar la forma y duración de la señal emitida por el transductor: el ancho de banda y la respuesta al impulso. Sin este elemento el transductor podría tener una respuesta impulsional larga, lo que deterioraría la resolución temporal. Finalmente, en la parte frontal de la oblea se adhieren capas de adaptación (1) que optimizan la transferencia de energía acústica al medio bajo estudio [40].

5. Características eléctricas de un transductor

A partir de lo mencionado puede inferirse que cuando se dispone de una pareja de transductores

CoRLC

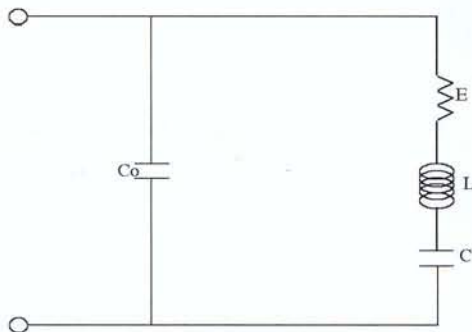
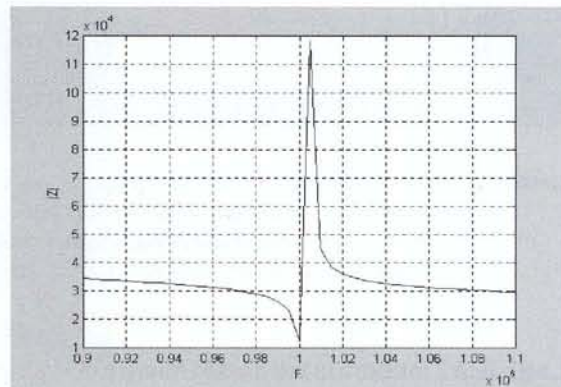


Figura 5. Circuito equivalente de un transductor. L representa la masa del transductor, C la rigidez, R las pérdidas por amortiguamiento mecánico, Co la capacitancia debida a los electrodos

En la figura 5 puede observarse que la mínima impedancia ocurre para la frecuencia de resonancia; esta última está asociada al modo de vibración mecánico responsable de la transmisión de energía hacia un posible medio bajo estudio. También se aprecia un valor máximo de impedancia a una frecuencia denominada de antirresonancia que es muy útil para el diseño del sistema de recepción; de hecho, el receptor se diseña para maximizar la

—uno funcionando en modo inverso y el otro en modo directo—, se tendrá un enlace ultrasónico; en otras palabras, un sistema eléctrico compuesto por un circuito excitador y uno receptor. Para poner a punto uno de estos sistemas es pertinente conocer el comportamiento eléctrico del transductor ultrasónico.

Debido al acoplamiento de energía entre la excitación eléctrica y la vibración mecánica, para estudiar el comportamiento electromecánico de un transductor suele recurrirse a diversos modelos de circuitos equivalentes, en particular a la impedancia eléctrica (factor crucial para el diseño de los sistemas de excitación y recepción); ella depende de los electrodos, material de la oblea y amortiguador (figura 5), y presenta un comportamiento de respuesta con frecuencia semejante al mostrado en la gráfica 1.



Gráfica 1. Impedancia del circuito de la figura 5. Se observan las frecuencias de resonancia y de antirresonancia

impedancia a una frecuencia de antirresonancia específica, con el propósito de obtener gran eficiencia eléctrica [41].

6. Patrón de campo acústico

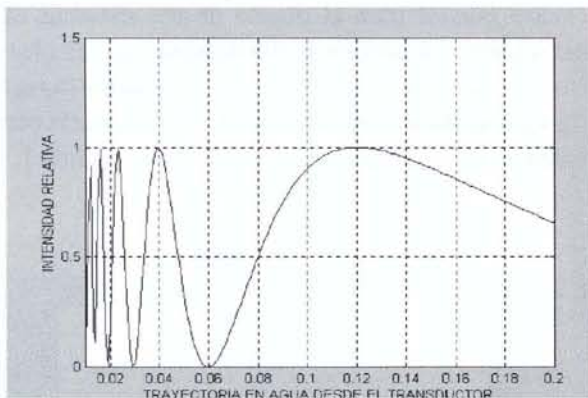
Cuando se aplica excitación eléctrica, la oblea transforma la energía en forma de ondas ultrasónicas; entonces, conviene conocer la forma como se

imágenes

distribuye la energía irradiada por ella. La obtención de la forma del perfil del campo acústico que se propaga axialmente desde el transductor está basada en una aplicación del principio de Huygens [42]; es decir, considera al frente de onda generado por una fuente de apertura finita y puede ser calculado

si la fuente está compuesta por un número infinito de fuentes puntuales, cada una emitiendo una onda esférica. Si se aplica la metodología descrita se demuestra que la distribución de intensidad relativa del campo acústico a lo largo del eje perpendicular a la oblea está dada por:

$$\frac{I}{I_0} = \left[\text{sen} \left(\frac{\pi}{\lambda} \right) \sqrt{r^2 + x^2} - x \right] \quad (5)$$



Gráfica 2. Representación gráfica de la ecuación (5). Se eligió una oblea de 8,5 mm de diámetro y frecuencia resonante de 2Mhz. Las ondas producidas se propagan en agua salada, en la cual la velocidad del sonido mide 1.500 m/s

La gráfica 2 muestra la intensidad relativa del campo acústico a lo largo del eje axial desde el centro del transductor; puede constatarse que exhibe grandes variaciones en la región cercana a éste, denominada zona de Fresnel. La distancia entre el transductor y el último máximo axial de intensidad (que se halla a 12 cm del transductor) está dada por:

$$Z_c = \frac{r^2}{\lambda} \quad (6)$$

Por otra parte, la difracción de primer orden permitirá calcular la divergencia del haz (figura 6); es decir:

$$r \text{ sen } \theta = 0.61 \lambda \quad (7)$$

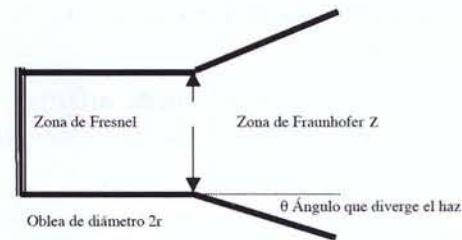


Figura 6. Perfil del ancho del haz; en él se distinguen las principales regiones que lo conforman

La ecuación (6) permite inferir dos aspectos importantes con relación al transductor:

- La profundidad de penetración del campo acústico y la longitud de la zona de Fresnel aumentan con el radio del cristal.
- Una mayor frecuencia del transductor posibilitará la detección de pequeñas discontinuidades existentes en un hipotético medio bajo estudio; es decir, logrará una alta resolución, un campo cercano más extenso y poca divergencia (7), pero menos profundidad de penetración [43-44].

7. Física del ultrasonido

El ultrasonido es una clase de onda mecánica longitudinal³ cuya frecuencia de vibración es mayor a los 20.000 ciclos por segundo, por ese motivo el oído humano no lo puede percibir. Desde el punto de vista de su aplicabilidad en diversos campos, ofrece ciertas ventajas: puede ser dirigido como un haz, cumple las leyes de reflexión y refracción y puede ser reflejado por objetos de pequeño tamaño. Sin embargo, también tiene limitaciones: se propaga muy poco a través de medios gaseosos y la cantidad de energía acústica reflejada depende de las desigualdades acústicas del medio.

Si se considera cualquier clase de sonido como una onda de presión, su propagación unidimensional estará gobernada por una expresión de la forma [45]:

$$\frac{\partial p}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (8)$$

En (8), c es la velocidad de fase y depende de las propiedades acústicas del medio; por ejemplo, la velocidad de un pulso ultrasónico a través del tejido blando de los seres humanos es de alrededor de 1.540 m/s; también es de 341 m/s en el aire a temperatura ambiente, y de 5.600 m/s en el acero inoxidable. En general, el sonido se propaga más rápido en sólidos que en líquidos, y en líquidos que en gases.

Puede asumirse que la solución de (8) es de la forma:

$$p(x,t) = p_o \cos(kx - wt) \quad (9)$$

En (9), p_o representa el valor absoluto de la amplitud de presión; w es la frecuencia angular y se relaciona con la frecuencia cíclica f , mediante $w = 2\pi f$. La variable k tiene varias denominaciones: constante

³ A diferencia de la luz la cual es una onda transversal que vibra perpendicularmente a la dirección en la que se propaga, una onda acústica longitudinal lo hace vibrando paralela a su dirección de propagación.

de propagación, número de onda o frecuencia espacial; esta última es la más indicada en el contexto de la imagenología ultrasónica y está relacionada con la longitud de onda por medio de la expresión $k = 2\pi/\lambda$.

Un ciclo de onda es una combinación de alta presión (compresión) y baja presión (rarefacción); asimismo, la distancia entre dos puntos de compresión (o dos de rarefacción) se denomina longitud de onda. La frecuencia se refiere al número de ciclos por unidad de tiempo y se relaciona de forma inversa con la longitud de onda; aumentos de frecuencia se traducen en disminución de la longitud de onda.

Otro concepto importante es la impedancia acústica (10) que es una propiedad que depende de la densidad del material a través del cual se propaga la onda ultrasónica; por consiguiente, una mayor impedancia indica una mayor densidad del material y viceversa.

$$z = \rho c \quad (10)$$

La reflexión o eco es la porción de energía acústica que retorna desde la frontera de un medio con cierta impedancia, mientras que la refracción o transmisión es el cambio de dirección que experimenta una onda cuando ésta pasa de un medio de cierta impedancia a otro con distinta impedancia.

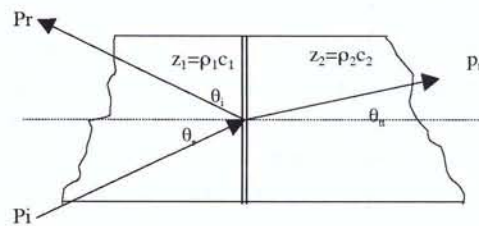


Figura 7. Se denomina desigualdad acústica a la frontera entre dos medios diferentes; en una de estas regiones puede ocurrir la refracción y la reflexión

A partir de la figura 7 expresiones similares a (9) pueden obtenerse para p_r , p_t , y p_i ; ellas deben satisfacer las dos siguientes condiciones de frontera: las

presiones acústicas en ambos lados de la desigualdad y las componentes normales de las velocidades en esas mismas regiones deben ser iguales.

Si además de estas condiciones se tienen en cuenta las leyes de la reflexión y de Snell, es decir:

$$\begin{aligned} c_1 \operatorname{sen} \theta_i &= c_1 \operatorname{sen} \theta_r, \text{ y} \\ c_2 \operatorname{sen} \theta_i &= c_2 \operatorname{sen} \theta_t \end{aligned} \quad (11)$$

se obtienen los coeficientes de reflexión R y de transmisión T , en términos de los ángulos de incidencia θ_i , de reflexión θ_r y de transmisión θ_t ; específicamente:

$$R = \frac{\frac{z_2}{\cos \theta_t} - \frac{z_1}{\cos \theta_i}}{\frac{z_2}{\cos \theta_t} + \frac{z_1}{\cos \theta_i}}, \quad T = 1 + R = \frac{2z_2}{\frac{z_2}{\cos \theta_t} + \frac{z_1}{\cos \theta_i}} \quad (12)$$

Para el caso especial de incidencia normal ($\theta_i=0$), las expresiones (12) se reducen a:

$$R = \frac{z_2 - z_1}{z_2 + z_1}, \text{ y } T = \frac{2z_2}{z_2 + z_1} \quad (13)$$

La atenuación es la disminución que experimentan la amplitud de la presión y la intensidad de una onda acústica cuando se propaga a través de un cierto medio.

En la derivación de las anteriores ecuaciones no se tuvieron en cuenta las posibles causas que conducen a pérdidas de energía y, por tanto, a la disminución de la potencia de la onda; entonces, es de esperarse que como ocurre con muchos tipos de radiación la intensidad (o la presión acústica) ultrasónica disminuya exponencialmente de acuerdo con la expresión:

$$I = I_0 e^{-\alpha x} \quad (14)$$

En (14), α es el coeficiente de atenuación, y x la distancia recorrida por la onda acústica. Aquí es de interés práctico comparar la razón entre la señal reflejada y la incidente; sin embargo, esas razones

pueden cubrir un amplio rango, con lo cual es conveniente expresarlas en unidades de decibelios. Así, para cierta razón de intensidades (o presiones acústicas), los decibelios (dB) de I_2 relativa a I_1 están dados por:

$$dB = 10 \log_{10} \frac{I_2}{I_1} \quad (15)$$

De esta forma, $dB=0$ para una razón de intensidades (o presiones acústicas) igual a la unidad, y para una razón de 0,5 tiene un valor de -3 dB. Como regla general aproximadamente válida, el coeficiente de atenuación se incrementa $1\text{dB/cm}^{-1} \text{MHz}^{-1}$; en consecuencia, una señal de 5 MHz puede sufrir una atenuación de 50 dB a lo largo de una distancia de 10 cm.

Existe un fenómeno ondulatorio estrechamente relacionado con la reflexión: la dispersión. La reflexión se presenta cuando la onda interactúa con discontinuidades en las propiedades mecánicas del medio (densidad y elasticidad) mucho más grandes que la longitud de onda; la dispersión proviene de tales interacciones, pero con discontinuidades y partículas más pequeñas que λ . Importantes desafíos surgen cuando se trata de extraer información útil contenida en los ecos producidos por la dispersión, pues ésta suele estar acompañada de cambios en la amplitud, fase, velocidad y dirección de la onda, como resultado de las heterogeneidades del medio; también surgen expansiones secundarias de la velocidad en distintas direcciones y una redistribución espacial de energía acústica que, de nuevo, cambia la amplitud. Por ende, el comportamiento de la dispersión depende de numerosos factores como la absorción, impedancia acústica mal adaptada, distribución espacial y la escala de las inhomogeneidades, forma del dispersor, y cantidad de ellos por unidad de volumen, entre otros [46].

El tamaño de las inhomogeneidades –incluidos el tamaño de los dispersores y la distancia interespa- cial– puede usarse para clasificar diferentes fenómenos de dispersión. Si la escala es significativamente menor que la longitud de onda se denomina *dispersión de Rayleigh*; si es comparable a ésta se denomi-

na *difracción*, y si es muy grande, en comparación con λ y las rugosidades son pequeñas, también en relación con λ , ocurrirá *reflexión especular*.

Por otra parte, la distribución de energía acústica dispersada es afectada por la forma y ubicación de los agentes dispersores. Por consiguiente, dispersores de formas variadas generan diferentes patrones de dispersión y la distribución espacial (periódica, aleatoria o intermedia) entre los dos límites produce dispersión de rango largo o corto⁴.

8. Generación, recepción y aplicaciones del ultrasonido

Los murciélagos se desplazan y alimentan emitiendo ráfagas ultrasónicas que rebotan en obstáculos como paredes y presas en forma de eco, lo cual, a su vez, es captado y procesado por el sistema de audición y el cerebro del animal.

Fundamentalmente, los sistemas ultrasónicos de medición se diseñan con los mismos principios: una unidad que se encarga de excitar el transductor, otra que se ocupa de la recepción de los ecos que llegan a él o a otro, un bloque que los procesa y un sistema de exhibición de resultados. Dependiendo de la aplicación, el diseño puede cambiar en algunas de sus partes constituyentes; por ejemplo, la excitación puede ser continua o transitoria; se puede usar un transductor o un arreglo de muchos; procesar la información en tiempo real o almacenarla para su posterior procesamiento, mostrar los resultados en un osciloscopio en un monitor o simplemente imprimirla.

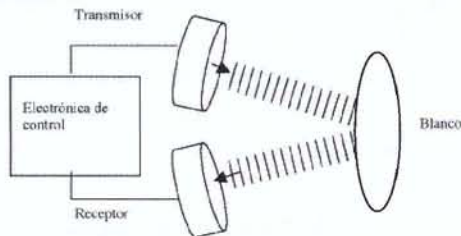


Figura 8. Sistema ultrasónico con excitación continua

⁴ La física que subyace en estos factores es el conjunto de interacciones mecánicas entre la perturbación acústica, la estructura y composición del material. La comprensión de esas propiedades proviene de las consecuencias inducidas por esos factores.

En aplicaciones como medición de distancias, control de movimiento (efecto Doppler), detección de presencia y reconocimiento de formas la etapa de excitación genera una señal continua, por ejemplo: una onda seno cuya frecuencia coincide con la de resonancia del transductor transmisor (figura 8).

Esta misma técnica suele utilizarse en la industria para medir velocidades de flujo y módulos elásticos. El principio de operación está basado en el tiempo que invierte la onda ultrasónica en recorrer la distancia desde el transmisor al receptor, después de haber sido reflejado por un cuerpo o sustancia que actúan como blanco; este intervalo se denomina *tiempo de vuelo* (TOF, por su sigla en inglés). Si la velocidad del sonido permanece invariante ($d = (c \times TOF) / 2$) para generar ondas ultrasónicas pueden usarse diferentes técnicas. Además de las de onda continua y de impulso-eco, se han implementado métodos más complejos como los que involucran modulación continua o pulsante.

Con frecuencia, las técnicas de impulso-eco son usadas en sistemas ultrasónicos comerciales, en aplicaciones industriales y médicas. Con este método se genera un corto tren de ondas, lo que permite que un solo transductor actúe de emisor y receptor [47-49].

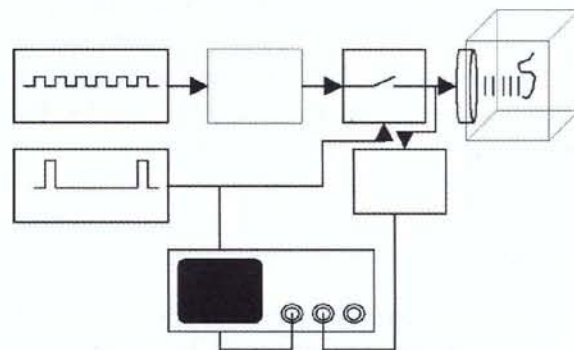


Figura 9. Sistema ultrasónico de alta frecuencia y alto voltaje utilizado para realizar ensayos no destructivos

El sistema consta de un generador de pulsos (G de P) que debe estar sintonizado a la frecuencia de resonancia del cristal; posteriormente, los pulsos

son amplificados (A) para producir ondas acústicas con la debida potencia. Si el conmutador (C), gobernado por el bloque GFRP (Generador de Frecuencia de Repetición de Pulso) está cerrado, la ráfaga de energía eléctrica excitará el transductor y de éste emergerá un pulso ultrasónico que viajará a través del medio bajo estudio; una vez allí existe la posibilidad de que la onda interactúe con alguna inhomogeneidad del medio y, en consecuencia, que se produzca un eco. Entonces, éste inicia su viaje de regreso al mismo transductor, el cual lo transforma en una señal eléctrica. Mientras tanto el conmutador (C) se abre y el eco es amplificado (A de E), para luego encaminarlo hacia uno de los canales del osciloscopio.

En la figura 9 se muestra el esquema que permite realizar un tipo de barrido llamado de *amplitud*, o simplemente *A-scan*. El nombre de la técnica se debe a que en la etapa de exhibición de resultados los ecos provenientes del interior de la muestra estudiada, que son el resultado de la interacción entre el campo acústico, la interface objeto-aire y posibles regiones en las cuales las impedancias características son diferentes (12), se observan por ejemplo en un osciloscopio.

La descripción anterior y el esquema de la figura 9 son el fundamento de una de las principales realizaciones técnicas usuarias de ultrasonido, los Ensayos No Destructivos (END), cuyo principal objetivo es detectar defectos, fallas, fisuras y toda suerte de problemas estructurales en materiales sólidos. Por ejemplo, en Ingeniería Civil es deseable conocer los parámetros y geometría de los defectos para evaluar aspectos como el tiempo de vida media de una construcción o sus componentes.

Los métodos convencionales de END (figura 9) están basados en la medición de la amplitud y el retardo de tiempo de la señal. Este enfoque permite evaluar el tamaño y posición de los defectos; si se considera el problema de soldadura entre placas en objetos homogéneos debe esperarse que las orientaciones de las rupturas que ésta posea sean diversas (figura 10).

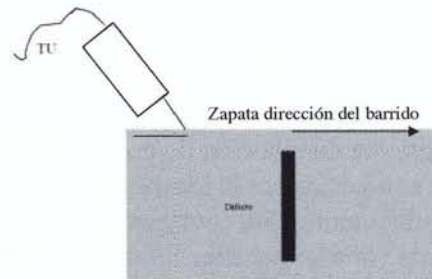


Figura 10. El Transductor Ultrasónico (TU) se desplaza sobre la superficie del objeto bajo estudio en el sentido indicado por la flecha

El procedimiento esquematizado en la figura 10 implica desplazar el transductor acoplado a una zapata que permite refractar las ondas ultrasónicas paralelamente a una de las superficies del objeto estudiado y almacenar las mediciones de dos variables: el tiempo de vuelo de los ecos y la coordenada de la posición del transductor; una vez procesados, ellos permiten reconstruir una imagen bidimensional del objeto. Este tipo de ensayo es llamado de *Brillo* o *B-scan*.

La imagenología ultrasónica es la segunda modalidad de imagen más popular en medicina, después de los rayos X. Se estima que el 25% de los procedimientos de imágenes médicas (resonancia magnética nuclear, tomografía computerizada, gammagrafía) involucran ultrasonido; por ejemplo: éstos se usan en obstetricia para estimar el tamaño y peso de un bebé en el vientre de su madre a partir de la medición realizada en una imagen ultrasónica del diámetro de su cabeza, la circunferencia abdominal y la longitud del fémur [50]. También se usan para medir el flujo de sangre en arterias y venas y detectar posibles obstrucciones; en este caso, los transductores utilizados deben tener un rango de entre 3 a 7 MHz, lo que garantiza una buena resolución.

10. Difracción de tiempo de vuelo

Como se ha mencionado, los END se usan desde hace varios años para garantizar la calidad de productos y equipos mediante la localización de discontinuidades, rupturas y fallas. El ultrasonido constituye una de las herramientas para hacer END.

El método de impulso-eco es el más conocido, en especial por su simplicidad y eficiencia, aunque la correcta medición de defectos situados perpendicularmente a la superficie bajo inspección constituye una de sus limitaciones. Con el fin de superar esa dificultad, una técnica relativamente reciente denominada *Difracción de tiempo de vuelo* (TOFD por sus siglas en inglés) es utilizada y consiste en aplicar un haz de ondas ultrasónicas dentro del material bajo ensayo con un cierto ángulo de inclinación con respecto a la superficie que se inspecciona. El método fue descrito inicialmente por Silk en 1977 [51] y se fundamenta en la difracción de la energía ultrasónica cuando ésta interactúa con las esquinas y los bordes de un defecto.

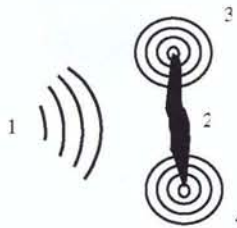


Figura 11. Descripción del principio de la técnica TOFD. 1) Haz de ondas ultrasónicas incidiendo sobre un eventual defecto; 2) defecto o fractura dentro del material bajo examen; 3) onda difractada por la parte superior de la falla; 4) onda difractada por la parte inferior de la falla

En la figura 11 se ilustra cómo una onda incidente puede cambiar su trayectoria cuando interactúa con una grieta; además de reflejarse o transmitirse, al intentar *doblar* los bordes de ésta experimentará un efecto denominado difracción. Este efecto goza de gran aceptación en el ámbito de END en soldadura, pues, en el caso de estructuras soldadas, con frecuencia se encuentran defectos verticales embebidos en ellas. Si se considera necesario calcular su tamaño, espesor y altura, la técnica TOFD es idónea para ello. A continuación se ilustrará la metodología para usarla en el contexto de la soldadura.

De la interacción entre las ondas ultrasónicas y los extremos de los defectos resulta una emisión de ondas difractadas en muchos ángulos. La detección de las señales difractadas hace posible establecer la presencia de defectos. La diferencia de tiempo de vuelo de tales señales está relacionada con la longitud de la falla y, en consecuencia, permite conocer su tamaño. En el proceso se utilizan dos transductores: uno como transmisor y otro como receptor, alineados a ambos lados de la muestra que se desea examinar (por ejemplo, una gota de soldadura), de tal manera que se cubra el volumen del material que va a ser inspeccionado.

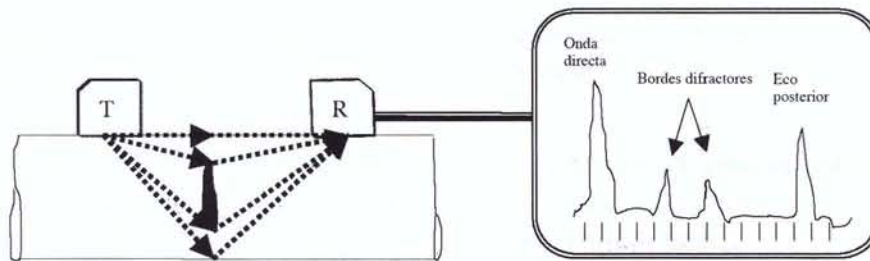


Figura 12. Una disposición usual para realizar END con TOFD. Un transductor habilitado como transmisor *T* y otro como receptor *R*. Se observan cuatro ondas y sus respectivas señales en un sistema de visualización. La primera, en orden descendente, es una onda lateral emitida directamente del emisor al receptor, que en la pantalla aparecería como un primer pico. Luego se encuentra una onda difractada por la parte superior del defecto, correspondiente con el segundo pico en la imagen de la derecha. Asociada a la parte inferior del defecto hay una tercera señal relevante relacionada con la difracción allí producida; finalmente, un eco proveniente de la parte posterior del objeto bajo estudio

En la figura 12 se muestra un montaje para END mediante la difracción de ondas. En la imagen de la derecha se observan barridos tipo *A* de un primer eco que alcanza directamente al transductor receptor y el cual constituye la onda superficial o lateral. Si no hubiese discontinuidades, fallas, fracturas o defectos, el segundo correspondería a un eco proveniente de la parte posterior del material que se está evaluando. Entonces, se deduce que cualquier señal generada por una discontinuidad debe ocurrir entre el eco debido a la onda lateral y el eco reflejado por la frontera posterior. Si la escala horizontal en

el sistema de visualización está convenientemente calibrada, conociendo la velocidad de fase de las ondas ultrasónicas y los tiempos de vuelo de los ecos y de las señales difractadas podrá calcularse el tamaño del defecto.

Cuando se estudia un cordón de soldadura, en las discontinuidades surgen fisuras por falta de fusión, carencia de penetración, inclusiones y porosidad, pero las discontinuidades planares son más perjudiciales que las de volumen.

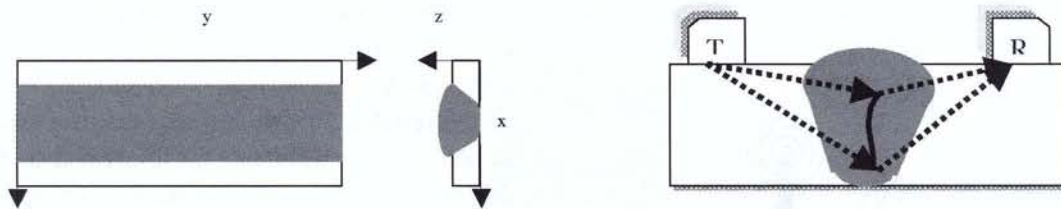


Figura 13. La imagen izquierda enseña la sección longitudinal y transversal de un cordón de soldadura. En el de la derecha puede observarse una ampliación de la sección transversal del cordón bajo examen y la energía acústica difractada por los bordes de un defecto vertical embebido en el mismo

La figura 13 muestra las posibles direcciones de barrido hacia las que debe desplazarse la pareja de transductores, con el fin de examinar juntas soldadas. Para localizar los defectos el movimiento se debe realizar paralelo al eje *y*; para determinar su forma y dimensiones el desplazamiento debe realizarse perpendicular al eje de la soldadura; es decir, en el sentido del eje *x*. El transductor *T* emite ondas refractadas entre 45° y 70° . Las señales que son difractadas por los bordes de la falla son captadas por el transductor receptor *R* y almacenadas para su posterior evaluación.

La onda lateral o directa entre los transductores (figura 12) se usa como señal de referencia para determinar la diferencia de tiempo de vuelo entre ésta y las ondas difractadas y con ello calcular la profundidad de la falla.

11. Conclusiones

- El ultrasonido ofrece soluciones que abarcan un amplio espectro de aplicaciones; ellas incluyen

procesos industriales, el área de la Bioingeniería y la Pedagogía.

- Los END han abierto una nueva dimensión en cuanto a control de calidad y de procesos en diversas aplicaciones industriales y médicas, lo que aporta metodologías más confiables para garantizar la calidad y el desempeño en estas áreas.
- Dados los resultados que esta técnica ha ofrecido desde su génesis, su desarrollo ha permanecido en constante evolución; sumado a esto los avances en ensayos no destructivos viene ampliando su horizonte de aplicación.
- Uno de los posibles temas de estudio que puede constituirse en complemento importante de las técnicas END es el desarrollo de sistemas automáticos de evaluación y diagnóstico, dado que en la actualidad esa responsabilidad recae en un inspector. Una consecuencia posible de la implementación de esas técnicas es la disminución del efecto de la variabilidad asociada

con la interpretación humana que suele estar influenciada por su destreza, estado anímico o fatiga.

- La evolución significativa de la capacidad cuantitativa para END mediante ultrasonido ha permitido el desarrollo teórico que facilita la comprensión de las interacciones elásticas entre

ondas y defectos, y el posterior desarrollo de algoritmos y modelos que incorporan métodos como la difracción.

- Para la aplicación particular de END sobre uniones soldadas, los métodos de impulso-eco y difracción de tiempo de vuelo son complementarios.

Referencias bibliográficas

- [1] Gueuning, F. E., Varlan M., Eugene C. E. y Dupuis, P. (Dec. 1997). "Accurate Distance Measurement by an Autonomous Ultrasonics Combinig Time of Flight and Phase Shift Methods". *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, Vol. 46.
- [2] Murugavel Raju. *Ultrasonic Distance Measurement with the MSP430*. (Oct. 2001). Texas Instrument, Application Report SLAA 136A.
- [3] Bucci, G. (Dec. 1997) "Numerical Method for Transit Time Measurement in Ultrasonic Sensor Applications". *IEEE Trans. Instrumet. Meas.*, Vol. 46.
- [4] Acevedo, P. (1999) "Ultrasonic Thickness Measuring System. *Instrumentation and Development*. Vol. 4 (2).
- [5] Parrilla, M., Anaya, J., and Fritsch, C. (1991). "Digital Signal Processing Techniques for High Accuracy Ultrasonic Range Measurements". *IEEE, Trans. Instrumet. Meas.*, Vol. 40.
- [6] Nitzpon, H. J., Rajaonah, J. C., Burckhardt, C. B., Dousse, B. and Meister, J. J. (Mar. 1995). "A New Pulsed Wave Doppler Ultrasound System to Measure Blood Velocities beyond the Nyquist Limit". *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelec., and Freq., Cont.*, Vol. 42.
- [7] Krause, M. and Wiggerhauser, H. (May. 1997). "Ultrasonic Pulse Echo Technique for Concrete Element Using Synthetic Aperture". *NDTnet*, Vol. 2.
- [8] Lawson, S. (April 1996). "Ultrasonic Testing and Image Processing for in Progress Weld Inspection". *NDT*, Vol. 1.
- [9] Maclsaac, D. and Hämäläinen, A. (January 2002). "Physics and Technical Characteristics of Ultrasonic Sonar Systems". *The Physics Techer*, Vol. 40.
- [10] Álvarez, J. A., Castillo, A. R., Martínez, O. D. y J. A. Rodríguez. (Julio 2006). "Reconocimiento de objetos en 3D por medio de ultrasonido". *Intekmia*, Universidad Santo Tomás, Bogotá, Vol. I.
- [11] Ossant, F., Poisson, G., Tran Huu Hue, L. P., Roncin, A. and Lethiedcq, M. (Feb. 1996). "Airborne Ultrasonic Imaging System for Parallelepipedic Objet Localization". *IEEE Trans. Instrumet. Meas.*, Vol. 45.
- [12] Jiménez, A. R. and Seco, F. (Sep. 2005). "Precise Localisation of Archaeological Findings with a New Ultrasonic 3D Positioning Sensor". *Sensors & Actuators*, Vol. 123.
- [13] Ludwig, R. (Feb. 1989). "A Nondestructive Ultrasonic Imaging System for Detection of Flaws Blocks". *IEEE Trans. Instrumet. Meas.*, Vol. 38.
- [14] Raisutis, R. and Mazeika, L. (2001). "The Simulation of Ultrasonic Imaging in the Case of the Objects with Complex Geometry". *Ultragarsas*, Vol., 38.
- [15] Greenslade, T.B. (Oct. 1994). "Experiments with Ultrasonic Transducers". *The Physics Teacher*, Vol. 32.
- [16] Greenslade, T. B. and Mason, J. A. (April, Oct. 1998). "Ultrasonic Interferometers". *The Physics Teacher*, Vol. 36.
- [17] Se-yuen, M. (Sep. 2003). "Wave Experiments Using Low Cost 40 KHz Ultrasonic Transducers". *Physics Education*, Vol. 38.
- [18] Navarro, D., Ríos, L. H. y Parra, H. (Agosto de 2004). "Sensores de ultrasonido usados en robótica móvil para la medición de distancias". *Scientia et Technica*, año X (25).
- [19] Watanabe, S. and Yonetama, M. (May. 1990). "Ultrasonic Robot Eyes Using Neural Networks". *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelec., and Freq., Cont.*, Vol. 37.
- [20] Figueroa, F. and Barbieri, E. (1991). "An Ultrasonic System for Structural Vibration Measurements". *IEEE Trans. Instrumet. Meas.*, Vol. 40.
- [21] Zagan, R., Petculescu, P., Peride, N. and Prodan, G. C. (Sep., 2003). *Comparision between Ultrasonic and Wavelets Analysis for Characterization Stainless Alloys*. WCU, Paris.
- [22] Daponte, P. (August 1995). "Ultrasonic Signal Processing Techniques for the Measurement of Damage Growth in Structural Materials". *IEEE Trans. Instrumet. Meas.*, Vol. 44.
- [23] Ramos, A., San Emeterio, J. L. y Sanz, P. T. *Vías de optimización en la generación de señales pulsadas para visualización ultrasónica*. Departamento de Se-

- ñales, Sistemas y Tecnologías Ultrasonicas, Instituto de Acústica, C.S.I.C., Serrano 144.
- [24] Pollakowski, M. and Ermert, H. (May. 1994). "Chirp Signal Matching and Signal Power Optimization in Pulse Echo Mode Ultrasonic Nondestructive Testing". *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelec., and Freq. Cont.*, Vol. 41.
- [25] Snyder, W. E. (1993). "Restoration of Ultrasonic NDT Images". *IEEE Trans. Ind. Elec.*, Vol. 40.
- [26] Ortega, T. y Seguel B., Solange. (2004). "Historia del ultrasonido: el caso chileno". *Revista Chilena Radiología*, Vol. 10 (2), pp.89-92.
- [27] Schueler, C. F., Lee, Hua and Wade, G. (July 1984). "Fundamentals of Digital Ultrasonic Imaging". *IEEE Trans. Sonics, and Ultrasonics*, Vol. 31.
- [28] Chilowsky, Constatin, Langevin, Paul. *Patente radar ultrasónico*. Disponible en: www.ob-ultrasound.net/chilo_lange_patents.html.
- [29] Fernández H., A. *Ensayos no destructivos*. Centro de Calidad de Asturias.
- [30] K.Woo Joseph S. *History of Ultrasound in Obstetrics and Gynecology*. Disponible en: www.ob-ultrasound.net/sokolov.html.
- [31] Sieend. Disponible en: <http://www.sieend.com.mx/pnd%20ut.htm>.
- [32] Ndt net. Disponible en: <http://www.ndt.net/article/az/ut/ute.htm>.
- [33] Alfaro, I. E. (2004). *Evaluación de la calibración de los equipos de ultrasonido terapéuticos de los Servicios de Salud Pública Metropolitana*. Tesis Universidad de Chile, Facultad de Medicina- Kinesiología.
- [34] Sdt North America. Disponible en: <http://www.sdtnorthamerica.com/apps/espanol/aplicacion.htm>.
- [35] Lawson, S. (April 1996). "Ultrasonic Testing and Image Processing for in Progress Weld Inspection". *NDTnet*, Vol. 1.
- [36] Panametrics. *Control ultrasónico de puntos de soldadura en chasis de automovil*. Disponible en: <http://www.llogsa.com>.
- [37] Ultranoticias. *Difreacción de tiempo de vuelo TOFD en la inspección de soldaduras*. Disponible en: <http://www.llogsa.com>.
- [38] Kasap, S.O. (2000). *Principles of Electrical Engineering Materials and Devices*. McGraw Hill.
- [39] Abdel Fattah, A. M. (2005). "Piezoceramic Material for Ultrasonic Probes". *Egypt. J. Solids*, Vol. 28.
- [40] San Emeterio, J. L., Ramos, A., Sanz, P. T. y Riera, E. (Julio de 1998). "Modelado de transductores piezoeléctricos multicapa para ecografía". *Revista Mundo Electrónico* (186).
- [41] Kino, G. (2000). *Acoustic Waves*. Prentice Hall, edición corregida.
- [42] Kinsler, L. E., Frey, A. R., Sanders, J. V. (1999). *Fundamentos de acústica*. Editorial Limusa.
- [43] Fish, Peter. (1990). *Physics and Instrumentation of Diagnostic Medical Ultrasound*. John Wiley & Sons.
- [44] Hecht, E., Zajac, A. (1986). *Optica*. Addison Wesley.
- [45] French, A. P. (1995). *Vibraciones y ondas*. Editorial Reverté S.A.
- [46] Anderson, M. E., Trahey, G. E. *A Seminar on K-Space Applied to Medical Ultrasound*. Departamento de Biomedical Engineering, Duke University.
- [47] Bantley, J. P. (1993). *Sistemas de medición*. Compañía editorial Continental.
- [48] Svilainis, L. and Puodzniumas, V. (1998). "The Hardware Concept of a New Digital Ultrasonic NDT System". *NDTnet*, Vol. 3.
- [49] Marioli, D., Narduzzi, C., Offelli, C., Petri, D., Sardini, E. and Taroni, A. (1992). "Digital Time of Flight Measurement for Ultrasonic Sensors". *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, Vol. 41.
- [50] Hughes, S. (2001). *Medical Ultrasound Imaging*. Physics Education.
- [51] Silk, M. G. (1984). "The Use of Diffraction Based Time of Flight Measurements to Locate and Size Defects". *Brit. J. of NDT*, Vol. 26.