

DISEÑO DE UN ANALIZADOR ULTRASÓNICO

NANCY TRUJILLO CASTRILLÓN

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES,
EXACTAS Y DE LA EDUCACION
INGENIERÍA FÍSICA
POPAYAN
2006**

DISEÑO DE UN ANALIZADOR ULTRASÓNICO

NANCY TRUJILLO CASTRILLÓN

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES,
EXACTAS Y DE LA EDUCACION
INGENIERÍA FÍSICA
POPAYAN
2006**

DISEÑO DE UN ANALIZADOR ULTRASÓNICO

NANCY TRUJILLO CASTRILLÓN

Trabajo de Grado presentado como requisito para optar al título de
Ingeniera Física

Director
MCs, HECTOR FABIO JARAMILLO.

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES,
EXACTAS Y DE LA EDUCACION
INGENIERÍA FÍSICA
POPAYAN
2006**

Nota de aceptación

Director Trabajo de Grado

MCs, Héctor Fabio Jaramillo.

Jurado

Ing, Arles Benítez Piamba.

Jurado

MCs, Jaury León Téllez.

Ciudad y fecha de Sustentación: Popayán, diciembre 11 de 2006.

*Luego de superar una serie de inconvenientes que retrasaron en parte el alcance de esta meta, hoy con mucho orgullo y satisfacción doy por superada esta etapa en mi vida, fruto del esfuerzo unificado de muchas personas que de una u otra manera contribuyeron en el alcance de la misma; por esta razón, quiero agradecer en primer lugar a **DIOS** a quien debo todo lo que soy, por haberme permitido culminar este proyecto, a mis **PADRES** y **HERMANOS** por su constante comprensión e incondicional apoyo, a todos los **DOCENTES DEL DEPARTAMENTO DE FÍSICA** que de una u otra manera me colaboraron durante el transcurso de la carrera, y por último a dos personas muy especiales que desde sus posiciones en vida tuvieron mucho que ver con la realización de mi carrera, la primera porque siempre creyó en mi y gracias a su decidido apoyo, pude iniciar mi carrera universitaria y la segunda porque siempre nos transmitió mucha fe y esperanza en esta carrera desconocida para nuestro entorno; desafortunadamente, por circunstancias de la vida ya no están hoy entre nosotros, pero estoy segura que desde el lugar donde se encuentren se deben sentir orgullosos por este triunfo, estas personas especiales a quienes me refiero son: **MARIA EMILIA TORRES DE VÁSQUEZ** (q-e.p.d) y a **HERMES SANDOVAL GALLARDO**, Mg. (q-e.p.d). Por lo anterior, no me queda más que dedicar este triunfo a todos ellos, pues más que un logro personal es un logro unificado de todos.*

GRACIAS POR TODO.

AGRADECIMIENTOS

El autor expresa sus más sentidos agradecimientos a:

Mg. Danilo Reynaldo Vivas Ramos, Rector de la Universidad del Cauca, por su invaluable colaboración en la realización de este proyecto.

Ing. Hector Fabio Jaramillo, Director del Proyecto por su orientación y colaboración.

Ing. Arles Benítez Piamba, Docente del Departamento de Física por su apoyo y colaboración durante el tiempo que duro la realización de este proyecto.

Mg. Jaury León-Téllez, Docente del Departamento de Física por su valiosa colaboración.

Mg. Hermes Sandoval Gallardo (q.e.p.d), Docente Fundador del programa quien con sus valiosas enseñanzas contribuyo en la formación intelectual y personal de ésta Ingeniera Física.

María Emilia Torres de Vásquez (q.e.p.d), apoyo determinante en el inicio y culminación de esta meta.

A mis Padres y Hermanos, quienes pese a las limitaciones económicas, han sido mi estímulo y apoyo más incondicional para el logro de esta meta.

Finalmente, quiero agradecer de todo corazón a todas aquellas personas que de una u otra manera me han apoyado y prestado su colaboración en el transcurso de mi carrera, a todas estas personas me gustaría nombrar; pero, la lista es interminable.

CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN	
INTRODUCCION	15
1. TECNICAS DE EVALUACION NO DESTRUCTIVA (END)	18
1.1 ANTECEDENTE HISTÓRICO.	18
1.2 FUNDAMENTOS DE LAS TECNICAS DE END.	19
1.3 VENTAJAS Y LIMITACIONES DE LAS TÉCNICAS DE END.	20
1.3.1 Ventajas.	20
1.3.2 Limitaciones.	21
1.4 BENEFICIOS DEL EMPLEO DE LAS TÉCNICAS DE END.	21
1.5 CLASIFICACIÓN DE LAS TECNICAS DE END.	22
1.5.1 Técnicas de inspección superficial.	22
1.5.2 Técnicas de inspección de la integridad o de la hermeticidad.	22
1.5.3 Técnicas de inspección volumétrica.	22
1.6 EL ULTRASONIDO INDUSTRIAL	23
1.6.1 Fundamentos del ultrasonido industrial.	24
1.6.2 Ventajas y limitaciones.	26
1.6.2.1 Ventajas	26
1.6.2.2 Limitaciones	27
2. FISICA DEL ULTRASONIDO	28
2.1 INTRODUCCION.	28
2.2 CLASIFICACIÓN DE LAS ONDAS ACÚSTICAS.	29
2.2.1 Forma geométrica de la onda.	29
2.2.2 Modos de propagación de las ondas.	30
2.3 ECUACION DE ONDA.	32
2.3.1 Ecuación de movimiento para un medio fluido	33
2.3.2 Ecuación de movimiento para un medio sólido	36
2.4 PROPIEDADES DE UNA ONDA ACÚSTICA PLANA.	45
2.5 PROPAGACIÓN ACÚSTICA EN MATERIALES ELÁSTICOS.	48
2.5.1 Velocidad del sonido	49
2.5.2 ¿Qué propiedades del material afectan su velocidad acústica?	50
2.6 CARACTERÍSTICAS DEL MEDIO.	52
2.6.1 Atenuación acústica.	53
2.6.2 Impedancia acústica.	55
2.7 FENOMENOS DE LAS ONDAS ACÚSTICAS.	56

2.7.1	Fenómenos de reflexión y transmisión.	56
2.7.2	Fenómeno de refracción.	58
2.7.3	Fenómeno de difracción.	59
2.8	SUPERPOSICIÓN O INTERFERENCIA DE ONDAS ULTRASONICAS	60
3.	FUNDAMENTOS DE LAS MEDIDAS ULTRASONICAS	63
3.1	PROPIEDADES MECANICAS DE LOS MATERIALES METALICOS.	63
3.2	PROPIEDADES TECNOLÓGICAS DE LOS MATERIALES METALICOS.	64
3.3	FALLAS O DEFECTOS EN MATERIALES METALICOS	64
3.4	LAS MEDIDAS ULTRASONICAS	66
3.4.1	Introducción.	66
3.4.2	Métodos de detección de defectos.	67
3.4.2.1	Método de transmisión.	67
3.4.2.1.1	Detección de defectos por el método de transmisión.	68
3.4.2.1.2	Ventajas y desventajas del método de transmisión.	69
3.4.2.2	Método de resonancia.	70
3.4.2.3	Método de pulso-eco.	72
3.4.2.3.1	Detección de defectos por el método del pulso-eco.	72
3.4.2.3.2	Eficiencia de los detectores de defectos.	74
3.4.2.3.3	Ventajas y desventajas del método del pulso-eco	80
3.4.3	Formatos de presentación de los datos.	81
4.	EL TRANSDUCTOR.	84
4.1	EL TRANSDUCTOR ULTRASÓNICO.	84
4.1.1	Características físicas del transductor ultrasónico.	84
4.1.2	Especificaciones técnicas del transductor ultrasónico.	86
4.1.3	Forma de onda y espectro del transductor.	87
4.1.4	Campo acústico irradiado por el transductor.	88
4.1.5	Dispersión del haz del transductor.	89
4.1.6	Clasificación de los transductores.	90
4.1.7	Excitación de un transductor ultrasónico.	93
4.2	EL CABLE CONECTOR.	94
4.3	CARACTERIZACION DE UN TRANSDUCTOR ULTRASÓNICO.	95
5.	DISEÑO DEL ANALIZADOR ULTRASONICO	98
5.1	INTRODUCCIÓN.	98
5.2	DISEÑO.	98
5.2.1	Diseño de la etapa de generación de la señal.	102
5.2.2	Diseño de la etapa de acondicionamiento de la señal.	105
5.2.3	Diseño de la etapa de conversión A/D y envío al PC.	115
5.2.4	Diseño de la etapa de procesamiento digital de la señal (PDS)	121
5.2.5	Visualización o interfaz gráfica.	125
5.3	RESULTADOS QUE SE ESPERAN OBTENER Y ANÁLISIS DE LOS MISMOS.	125

6. CONCLUSIONES.	130
7. FUTUROS DESARROLLOS	131
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	132
ANEXOS	136

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 2.1 Características y aplicación de las ondas Ultrasónicas	32
Tabla 2.2 Propiedades Acústicas de algunos materiales	52
Tabla 5.1 Longitudes del tren de pulsos y defectos mínimos para cada uno de los transductores.	127

INDICE DE FIGURAS

		Pág.
Figura 1.1	Configuración típica de la técnica ultrasónica del pulso/eco.	25
Figura 2.1	Espectro acústico.	28
Figura 2.2	Propagación de las ondas longitudinales y transversales.	30
Figura 2.3	Orbita y movimiento de una onda de Rayleigh.	31
Figura 2.4	Volumen arbitrario V en un fluido ideal.	33
Figura 2.5	Geometría de un sólido deformable.	36
Figura 2.6	a) Propagación de una onda plana unidimensional (onda P); b) propagación de ondas transversales planas unidimensionales con polarización vertical (SV) y con polarización horizontal (SH).	45
Figura 2.7	Propiedades básicas de una onda continua.	46
Figura 2.8	Relación entre el coeficiente de absorción y la frecuencia para un medio sólido típico.	54
Figura 2.9	Reflexión y transmisión de ondas planas que inciden normalmente en una frontera.	56
Figura 2.10	Efecto de una capa de lados paralelos entre dos medios.	57
Figura 2.11	Reflexión y refracción de la onda ultrasónica.	58
Figura 2.12	Ondas planas viajando dentro de un material.	59
Figura 2.13	Fenómeno de difracción.	60
Figura 2.14	Interferencia a) Interferencia constructiva b) y c) Interferencia destructiva.	60
Figura 2.15	Emisión acústica de 5 reflectores en la superficie de un transductor ultrasónico.	62
Figura 3.1	Método de transmisión.	67
Figura 3.2	Interpretación gráfica de la resonancia como una adición de múltiples reflexiones de onda ultrasónicas en una capa de material: a) resonancia de ondas continuas, b) resonancia de pulso.	70
Figura 3.3	Diagrama general del detector de defectos ultrasónico utilizado por el método del pulso-eco.	73
Figura 3.4	Imágenes del pulso eléctrico formado por el transductor: a) Pulso rectangular, b) Pulso exponencial (amortiguado).	74
Figura 3.5	Oscilaciones cuando la frecuencia aplicada es a) igual a, b) menor que, y c) más grande que la frecuencia resonante f_0 (vibración natural). 1 = pulso excitante, 2 = pulso resultante.	75
Figura 3.6	Longitud del pulso y poder de resolución del método del pulso-eco.	76
Figura 3.7	Medida de la altura del eco como función de la distancia del defecto al transductor; $f=5$ MHz, $\lambda = 1$ mm	78
Figura 3.8	Reflexión de ondas de varios defectos que tienen dimensiones mucho	79

	más grandes que la longitud de onda.	
Figura 3.9	Eliminación de la zona muerta mediante el uso de dos sondas inclinadas angularmente una respecto a la otra.	81
Figura 3.10	Eliminación de la zona muerta por el método del pulso-eco.	81
Figura 3.11	Respuestas típicas de la evaluación, tipo A (Scan-A) para diferentes posiciones. La respuesta en el transductor se muestra como función del tiempo.	82
Figura 3.12	Respuesta típica del barrido, tipo B. La respuesta del transductor se muestra como función de una coordenada espacial (eje x).	82
Figura 3.13	Respuesta típicas del barrido, tipo C (Scan-C). La respuesta del transductor se da como función del espacio en dos dimensiones(x,y).	83
Figura 4.1	Corte de un típico transductor de contacto.	85
Figura 4.2	Forma de onda.	87
Figura 4.3	Espectro de frecuencia y ancho de banda.	88
Figura 4.4	Relación entre el ancho de banda y la duración de la onda.	88
Figura 4.5	Campo acústico de un transductor.	88
Figura 4.6	Cable coaxial.	94
Figura 4.7	Pulso ultrasónico observado en la pantalla del osciloscopio.	96
Figura 4.8	Espectro de frecuencia del pulso de la figura 4.7.	96
Figura 5.1	Principales componentes de un sistema de evaluación por ultrasonidos.	102
Figura 5.2	Circuito del generador de pulsos.	104
Figura 5.3	Amplificador de señal pequeña.	105
Figura 5.4	Etapas de acondicionamiento de la señal eco.	106
Figura 5.5	Circuito amplificador.	107
Figura 5.6	Filtro pasa banda de 2º orden.	108
Figura 5.7	Circuito del filtro pasa banda de 4º orden.	113
Figura 5.8	Circuito amplificador de pequeña señal.	114
Figura 5.9	Diagrama esquemático de la etapa de conversión A/D y envío de la señal al PC.	115
Figura 5.10	Etapas de almacenamiento de datos.	118
Figura 5.11	Circuito de comunicación serial.	119
Figura 5.12	Configuración del puerto serial, lectura del puerto y almacenamiento de la información.	122
Figura 5.13	Envío del dato de confirmación al PIC a través del Puerto Serial.	123
Figura 5.14	Procesamiento Digital de la Señal Ultrasónica.	124
Figura 5.15	Interfaz gráfica.	125
Figura 5.16a	Señal de entrada y señal del escalón que contiene el bloque de acero.	128
Figura 5.16b	Señal de entrada y señal de la pared posterior del bloque.	128
Figura 5.16c	Eco de un defecto cercano al transductor.	129
Figura 5.16d	Eco de un defecto cuya superficie de reflexión es mayor que la superficie del defecto observado en la figura anterior, y el cual se halla ubicado cerca de la pared posterior del bloque de acero.	129

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A	Propiedades Acústicas de los materiales metálicos tomados como referencia. 137
ANEXO B	Acoples Ultrasónicos. 138
ANEXO C	Materiales Piezoeléctricos. 139
ANEXO D	Características y especificaciones de los materiales utilizados como elemento activo en los transductores ultrasónicos. 141
ANEXO E	Cables coaxiales estándares de Panametrics. 142
ANEXO F	Hoja de prueba del transductor A107S - RB. 143
ANEXO G	Hoja de prueba del transductor A409S - RB. 144
ANEXO H	Distancias focales para palpadores de la firma Panametrics. 145
ANEXO I	Información suministrada por Panametrics, sobre las especificaciones técnicas de los transductores A107S - RB y A409S – RB. 146
ANEXO J	Circuito total de la etapa de acondicionamiento de la señal. 149
ANEXO K	El programa en pseudocódigo para el PIC 18F452. 150
ANEXO L	Circuito completo del Analizador Ultrasónico. 152
ANEXO M	Solución Alterna. 153

RESUMEN

El proyecto comprende el diseño lógico de un Analizador Ultrasónico, el cual se utilizará para detectar defectos estructurales de materiales empleados en la industria, especialmente materiales como el acero (de tipo metálico), por ser el ultrasonido una de las técnicas de Evaluación no Destructiva que se utiliza en el control de calidad de procesos de fabricación y mantenimiento de estructuras, que deben ser sometidas a algún tipo de esfuerzo mecánico repetitivo.

El proyecto consta de 3 etapas:

1. Fundamentación científica en la física del ultrasonido, como soporte fundamental para el diseño posterior del analizador ultrasónico.
2. Diseño físico del Analizador Ultrasónico, considerando cinco aspectos básicos:
 - a. **Sistema de emisión:** genera las ondas de ultrasonido. Consta de: (1) un circuito electrónico de excitación; (2) el transductor ultrasónico y; (3) un medio de acople.
 - b. **Sistema de recepción y acondicionamiento de la señal:** consta de: (1) el transductor ultrasónico; (2) un circuito análogo de amplificación y filtrado de la señal.
 - c. **Sistema de conversión A/D y envío de la señal al PC:** consta de un conversor A/D, una memoria RAM, un PIC 18F452, un CI MAX232, una etapa de contadores y una etapa de multiplexores.
 - d. **Procesamiento digital de la señal:** consta de: (1) un filtro pasabanda antialiasing (2) una autocorrelación de la señal, y (3) una transformada rápida de Fourier.
 - e. **Visualización de la señal:** es la interfaz gráfica del sistema que permite visualizar la señal en el dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia. La interpretación de la información que esta visualización ofrece, corresponde a la persona que opere el analizador.
3. Análisis de posibles resultados en base a la física del ultrasonido, y al comportamiento de las señales ultrasónicas en el material de prueba.

El diseño analizador ultrasónico estará enfocado al análisis de estructuras metálicas, utilizando la técnica ultrasónica del “pulso-eco” modo A, como un primer paso en el conocimiento científico y aplicación tecnológica de la técnica del ultrasonido en la evaluación no destructiva, con proyección a posteriores investigaciones y desarrollos tecnológicos en el Departamento de Física.

INTRODUCCIÓN

La Evaluación no Destructiva (END), es un campo de la ingeniería que se desarrolla rápidamente. Técnicas como la digitalización de imágenes, la radiografía por neutrones, el electromagnetismo, la emisión acústica ultrasónica y otras que eran relativamente desconocidas hasta hace algunos años, se están convirtiendo en herramientas de uso cotidiano gracias a los óptimos sistemas de control de calidad que han sido implementados a partir de ellas, por las industrias que se esfuerzan por mantenerse a la vanguardia del mercado de sus productos ^[1].

En la fabricación y/o construcción de componentes, ensambles de equipos e instalaciones, intervienen una serie de actividades cuya finalidad está bien definida y delimitada, destacándose principalmente: el diseño, la fabricación y/o construcción, el montaje y finalmente la inspección y las pruebas de eficiencia.

Estas actividades siempre se llevan a cabo, trátase de un tornillo, un embarque automotriz, un intercambiador de calor, un reactor químico, el casco de un barco, una central de energía, un gaseoducto, o una simple pieza metálica que puede ser utilizada en la construcción de un puente o de un edificio.

Las técnicas que revisten mayor importancia, son las que normalmente se practican a los materiales para calificarlos sobre la base de estándares predefinidos, por diseño o por especificaciones particulares de control de calidad. Entre estas técnicas se destacan ^[1]:

- ☆ Técnicas de Evaluación Destructiva
- ☆ Técnicas de Evaluación no Destructiva (END).

El objetivo principal de las técnicas de Evaluación Destructiva es determinar cuantitativamente el valor de ciertas propiedades de los materiales, como resistencia mecánica, tenacidad o dureza. La ejecución de estas técnicas involucra el daño del material, la destrucción de la probeta o la pieza empleada en la determinación correspondiente, de donde se concluye que: los ensayos destructivos son la aplicación de métodos físicos directos que alteran de forma permanente las propiedades físicas, químicas, mecánicas o dimensionales de un material, parte o componente sujeto a inspección ^[1].

Este tipo de evaluación es necesario para comprobar si las características de un material cumplen con lo especificado durante el diseño, y para valorar el nivel de calidad del proceso desarrollado en él. Sin embargo, estas pruebas no se pueden aplicar a todas las partes o componentes, ya que serían destruidos y perderían su utilidad. Por tanto, la evaluación destructiva se caracteriza por el muestreo y, si los resultados de la muestra son exitosos el resto de la producción estará igual de bien o, en su defecto igual de mal, siempre

y cuando el proceso no sea alterado, aunque un cambio bajo estas condiciones se considera poco probable. El control de las pruebas de evaluación destructiva se realiza a través de técnicas estadísticas ^{[1] y [2]}.

El desarrollo de nuevas tecnologías y la optimización de los productos o los requisitos de seguridad como en el caso de la industria aeroespacial, la nucleoelectrónica o la petroquímica, impusieron nuevas condiciones de inspección, las cuales establecieron la necesidad de verificar hasta en un 100% los componentes críticos, y plantearon una severa dificultad a los departamentos de calidad, que obligó al uso de otras técnicas de inspección diferentes a la visual, con las cuales se podía medir la integridad de los componentes sin destruirlos. Esto se hizo posible mediante la evaluación de alguna propiedad física del material, que estuviese relacionada con las características críticas del componente sujeto a inspección; dando inicio así, a la aplicación de las pruebas no destructivas, las cuales actualmente son de uso común en casi todos los sectores industriales ^[1].

Las técnicas de END, se fundamentan en la aplicación de métodos físicos indirectos, como la transmisión del sonido, la opacidad al paso de la radiación, etc., y tienen la finalidad de verificar el perfecto estado de las piezas examinadas. Sin embargo, cuando se aplica este tipo de prueba no se busca determinar las propiedades físicas inherentes de las piezas, sino verificar su homogeneidad y continuidad. Por lo tanto, no sustituyen las técnicas de evaluación destructiva, sino que las complementan ^[1].

Este tipo de técnicas como su nombre lo indica, no alteran de forma permanente las propiedades físicas, químicas, mecánicas o dimensionales de un material. Por tanto, no inutilizan las piezas que son sometidas a ellas y tampoco afectan de forma permanente las propiedades de los materiales que las componen. Debido a estas características cada vez más ventajosas, estas técnicas se han convertido en una herramienta obligada, no solo en la evaluación de cualquier tipo de estructura ya sea metálica o no metálica, sino que han tenido una amplia acogida en el diagnóstico médico ^{[1] y [2]}.

Analizando las numerosas ventajas que un proyecto enmarcado dentro de este tema podría proporcionar, se desarrolló la propuesta “Diseño de un Analizador Ultrasónico”, buscando con ello complementar la formación del Ingeniero Físico, pues el ultrasonido es un área de mucho interés y amplia aplicabilidad en la evaluación de los materiales que se utilizan en los desarrollos industriales.

La existencia de una amplia variedad de transductores ultrasónicos, cuya selección depende de las características del transductor y de las aplicaciones que se deseen implementar, hizo posible enfocar el diseño a una necesidad específica. En la cual, la selección del transductor adecuado y el diseño del circuito electrónico, consecuente con el procesamiento digital de la señal, son el reto a superar para lograr resultados satisfactorios acordes con el objetivo de la carrera.

Por tanto, teniendo en cuenta los objetivos del proyecto, el documento comprende dos fases que son:

- ☆ La fundamentación científica soportada en las técnicas de Evaluación no Destructiva, la física y procesos matemáticos del ultrasonido, los fundamentos de las medidas ultrasónicas y el transductor. Esta temática se desarrolla en los primeros cuatro capítulos.
- ☆ El diseño del Analizador Ultrasónico, aspecto expuesto en el capítulo quinto.

1. TECNICAS DE EVALUACION NO DESTRUCTIVA (END)

1.1 ANTECEDENTE HISTÓRICO.

Las técnicas de Evaluación no Destructiva (END) se han practicado durante décadas, con rápidos progresos estimulados por los avances tecnológicos ocurridos durante la Segunda Guerra Mundial, y el interés por desarrollar mejores sistemas de defensa ^[3].

Durante los primeros años, el objetivo principal fue la detección de defectos con el propósito de garantizar la “Vida Segura o comportamiento seguro de los materiales”, durante el tiempo en que fuesen parte activa de un proceso de excitación temporal o permanente ^[3].

La detección de defectos tomó fuerza al considerar que un material durante su vida útil no debe desarrollar defectos macroscópicos (roturas, fracturas, distorsiones, etc.), si estos se detectaban previamente y el material defectuoso era retirado del proceso o sistema involucrado. En respuesta a esta necesidad, se utilizaron técnicas cada vez más sofisticadas como: corrientes de Foucault, rayos X, tintes penetrantes, partículas magnéticas, emisión acústica ultrasónica, etc. ^[3].

A comienzos de los años 70, suceden dos acontecimientos que originan un cambio importante en la aplicabilidad de las técnicas de Evaluación no Destructiva en el control de calidad ^[3]:

- ☆ La detección confiable y precisa de irregularidades extremadamente pequeñas en los componentes de sistemas industriales. Este avance exigió que el proceso y transformación de materiales, así como la elaboración de los componentes fuesen más rigurosos a fin de elevar el nivel de confiabilidad de operación. El nuevo panorama tecnológico obligó a los responsables de la maquinaria industrial y los sistemas de transporte, a imponer estándares de calidad por lo cual muchas piezas fueron rechazadas, sin que por ello las probabilidades de falla dejaran de ser importantes.
- ☆ El surgimiento de la investigación especializada en la generación y comportamiento de las fracturas del material, permitió predecir si una grieta de un tamaño determinado evolucionaría bajo ciertas condiciones de operación, siempre que se pudiera conocer la dureza a la fractura del material, lo cual podría causar la destrucción del sistema. También se desarrollaron teorías y procesos tecnológicos para predecir el comportamiento dinámico de los defectos bajo ciertas condiciones de operación de los componentes de los sistemas productivos e industriales.

Con estos nuevos conocimientos y experiencias tecnológicas, fue posible establecer márgenes confiables de seguridad para aceptar piezas que poseen defectos a partir del

procesado y transformación de los materiales, surgiendo así una nueva filosofía en el campo del desarrollo y la aplicación tecnológica conocida como “fallo seguro” o filosofía del “diseño tolerante a daños”, según la cual los materiales y componentes con defectos podían entrar y mantenerse en servicio, si se garantizaba que dichos defectos no llegarían a tener un tamaño crítico que pudiera producir la falla ^[3].

Dado que la detección de los defectos no era suficiente para garantizar el buen funcionamiento de un componente o sistema, se exigió la información cuantitativa sobre las características de los mismos, como medida para predecir la vida restante del elemento ^[3].

Esto condujo a la creación de programas académicos y de investigación en universidades e instituciones científicas en todo el mundo, especialmente en los países industrializados forzados por la competencia en la calidad de sus productos, condición que dio origen a una nueva disciplina conocida como “Evaluación no Destructiva Cuantitativa”, ampliamente utilizada y que ha contribuido al establecimiento de procedimientos y normas de seguridad en la industria aérea, eléctrica, nuclear, etc. ^[3].

En la actualidad una gran variedad de industrias entre ellas la de la construcción, hacen uso de las más recientes técnicas de evaluación no destructiva para el diagnóstico de estructuras, contenedores, ductos, tanques, y en general de toda la infraestructura de sus empresas, pues estas técnicas tienen como ventaja la rapidez en la detección de las condiciones físicas de interés, así como la facilidad en las exploraciones y toma de datos ^[4].

El ultrasonido es una de las técnicas de evaluación no destructiva más reciente, con la cual se puede llegar a lugares de difícil acceso sin provocar daño alguno en la estructura interna de los elementos, y los resultados se pueden visualizar mediante imágenes y gráficas que identifican con precisión las características físicas de dichos elementos, por lo que se concluye que el ultrasonido es una técnica muy importante en el presente y futuro desarrollo industrial ^[4].

1.2 FUNDAMENTOS DE LAS TECNICAS DE END.

Las técnicas de END, son métodos de análisis que permiten examinar un objeto sin afectar su estructura interna. Con ellos se pueden detectar defectos internos en los componentes utilizando principios físicos que no alteran la utilidad de los mismos, además de controlar la evolución de los defectos durante la vida útil del componente ^{[5] y [6]}.

Existen tres grupos de defectos que actúan en el desarrollo y la aplicación de los materiales en el entorno industrial. Estos son ^[6]:

- ☆ Defectos internos procedentes de deficiencias en el proceso de producción del material base (pureza de material empleado).
- ☆ Defectos ocasionados durante el proceso de fabricación del componente.
- ☆ Defectos generados durante la operación o servicio del componente.

Las técnicas de END se utilizan en todas las fases de diseño o manufactura de un producto incluyendo la selección de materiales, investigación y desarrollo, ensamble, control de calidad y mantenimiento; es decir, suministran un excelente balance entre el control de calidad y la relación costo-eficiencia. En consecuencia, estas técnicas incluyen métodos que permiten ^[5]:

- ☆ Detectar imperfecciones internas o externas.
- ☆ Determinar la estructura, composición o propiedades de los materiales.
- ☆ Medir las características geométricas.

Algunos defectos que se suelen detectar con las técnicas de END son: variaciones en la composición química, grietas superficiales e internas, dopaje, laminaciones, defectos en soldaduras, defectos en tratamientos superficiales, porosidades y variaciones en tamaños de grano. ^{[6] y [7]}.

1.3 VENTAJAS Y LIMITACIONES DE LAS TÉCNICAS DE END ^[1].

Como cualquier otro método utilizado en el análisis de materiales, las técnicas de END tienen sus ventajas y limitaciones que son:

1.3.1 Ventajas:

- ☆ Estas técnicas se pueden utilizar en cualquier etapa de un proceso productivo. Por ejemplo:
 - ✗ Durante la recepción de las materias primas que llegan al almacén para: comprobar la homogeneidad, la composición química y evaluar ciertas propiedades mecánicas.
 - ✗ Durante los diferentes pasos de un proceso de fabricación, para comprobar si el componente está libre de defectos que pueden producirse por: un mal maquinado, un tratamiento térmico incorrecto, o una soldadura mal aplicada.
 - ✗ En la inspección final o de entrega de productos terminados, para garantizar al usuario que la pieza: cumple con las condiciones mínimas de calidad, fue fabricada con el material requerido, y que desempeñará de manera satisfactoria la función para la que fue creada.
 - ✗ En la inspección y revisión de partes y componentes que se encuentran en servicio para: confirmar que todavía se pueden emplear de manera segura, conocer el tiempo de vida restante, o para programar adecuadamente las interrupciones por mantenimiento sin afectar el proceso productivo.
- ☆ En la utilización de estas técnicas sólo existen pérdidas cuando se detectan piezas defectuosas, dado que su uso no altera las propiedades intrínsecas del material.
- ☆ Este tipo de inspección es muy rentable cuando se inspeccionan partes o componentes críticos en los procesos de fabricación controlada, o en la producción de piezas a gran escala.

1.3.2 Limitaciones:

- ☆ En algunos casos la inversión inicial es alta, pero se puede justificar cuando se analiza correctamente la relación costo-beneficio, de manera especial lo referente a tiempos muertos en líneas productivas.
- ☆ La propiedad física a controlar se mide de manera indirecta y su evaluación se realiza cualitativamente o por comparación. Esta limitación se puede superar si se fabrican patrones de referencia que permitan una excelente calibración de los sistemas de inspección.
- ☆ Una misma indicación se puede interpretar y ponderar de forma diferente por dos o más controladores de calidad, encargados de llevar a cabo los procesos de inspección sí: a) no existen procedimientos de inspección debidamente preparados y calificados, b) no se cuenta con los patrones de referencia o calibración adecuados.
- ☆ Si bien, las técnicas END son relativamente fáciles de aplicar, se requiere que el personal que las realice haya sido debidamente capacitado y calificado, además debe contar con la experiencia necesaria para interpretar y evaluar correctamente los resultados, evitando así el desperdicio de material o las pérdidas de tiempo por sobre inspección.

1.4 BENEFICIOS DEL EMPLEO DE LAS TÉCNICAS DE END.

Antes de mencionar los beneficios que ofrece la aplicación de las técnicas de END, se debe aclarar que éstas sólo hacen parte de un buen proceso de control de calidad y que la información que ellas suministran, si no se analiza y se aplica en medidas de tipo preventivo para evitar la repetición de los problemas, no reducirá los costos de producción, y en un momento dado sí aumentará los costos de inspección ^[1].

Los beneficios más destacados que ofrece el empleo de las técnicas de END son:

- ☆ La correcta aplicación y combinación de estas técnicas con un buen análisis estadístico, contribuye a mejorar el control de calidad de los procesos de fabricación de partes, componentes o servicios; además, ayuda a mejorar la productividad de una planta, al prevenir los ceses de funcionamiento imprevistos por falla de un componente crítico.
- ☆ El uso de estas técnicas como parte de la inspección preventiva reduce notablemente los costos de reparación o reproceso, y ayuda a ahorrar tiempo y recursos que de otra forma se desperdiciarían en una pieza que finalmente puede tener un costo de producción muy superior al presupuestado.
- ☆ Otro beneficio que por lo general no tienen en cuenta muchas empresas es que el uso de las técnicas de END como herramienta auxiliar del mantenimiento industrial, facilita una mejor evaluación de las partes y componentes en servicio, lo que permite optimizar la planeación del mantenimiento correctivo y reducir tiempo y costos de reparación.
- ☆ La aplicación de las técnicas de END en la fabricación de bienes de capital de servicio especializado, viene siendo requerida por contrato, o por los códigos y regulaciones nacionales e internacionales aplicables al producto. Por tanto, la empresa que cuente

con un sistema de inspección no destructivo podrá cumplir más fácilmente con los requisitos de calidad que se exijan.

- ☆ Actualmente, los países desarrollados combinan las técnicas de END con otras actividades en los procesos de control de calidad, para mantener un nivel uniforme en la calidad del producto final y así mejorar la competitividad de sus productos en el mercado nacional e internacional.

1.5 CLASIFICACIÓN DE LAS TÉCNICAS DE END ^[1].

De acuerdo con su aplicación, las técnicas de END, se dividen en:

1.5.1 Técnicas de inspección superficial.

Sólo comprueban la integridad superficial de un material; razón por la cual, su aplicación es conveniente cuando se necesita detectar discontinuidades que están en la superficie, o a profundidades menores de 3 mm. Este tipo de inspección se realiza por medio de cualquiera de las siguientes técnicas:

- ☆ Inspección Visual (VT).
- ☆ Líquidos Penetrantes (PT).
- ☆ Partículas Magnéticas (MT).
- ☆ Electromagnetismo (ET).

1.5.2 Técnicas de inspección de la integridad o de la hermeticidad.

Son aquéllas que comprueban la capacidad de un componente o recipiente para contener un fluido (líquido o gaseoso) a una presión superior, igual o inferior a la atmosférica, sin que existan pérdidas apreciables de presión o de volumen del fluido de prueba en un período previamente establecido. A este tipo de inspección pertenecen las siguientes técnicas:

- ☆ Pruebas por cambio de presión hidrostática o neumática, o por pérdidas de fluido.
- ☆ Cámara de burbujas.
- ☆ Detector de halógenos.
- ☆ Espectrómetro de masas.
- ☆ Detector ultrasónico.

1.5.3 Técnicas de inspección volumétrica.

Su aplicación permite conocer la integridad de un material en su espesor y detectar las discontinuidades internas que no son visibles en la superficie de la pieza. La inspección se realiza por medio de una de las siguientes técnicas:

- ☆ Radiografía Industrial (RT)
- ☆ Radiografía Neutrónica (NT).
- ☆ Emisión Acústica (AET).
- ☆ Ultrasonido Industrial (UT)

1.6 EL ULTRASONIDO INDUSTRIAL

Esta técnica de END tiene sus orígenes en los ensayos de percusión, en los cuales los materiales eran golpeados con un martillo y se escuchaba cuidadosamente el sonido que emitía la pieza examinada. La desventaja de estos ensayos radicaba en que solo permitían detectar defectos de gran magnitud, los cuales eran capaces de ocasionar un cambio apreciable en el tono del sonido que emitía el material sujeto a la prueba, motivo por el cual este tipo de ensayos eran poco confiables en la inspección preventiva ^[8].

La historia del Ultrasonido Industrial como disciplina científica pertenece al siglo XX. En 1924, El investigador Ruso Sokolov estudió la propagación de ondas ultrasónicas en líquidos y sólidos, y desarrolló las primeras técnicas de inspección para la detección de defectos internos en metales utilizando ondas de ultrasonido, siendo el primer método ultrasónico empleado para visualizar la estructura interna de los materiales. Los experimentos iniciales se basaron en la medición de la pérdida de intensidad de la energía acústica al viajar en un material. Para tal procedimiento se requería del empleo de un emisor y un receptor de la onda ultrasónica ^{[8] y [9]}.

A partir de los trabajos de Sokolov, el Ultrasonido Industrial llega a adquirir un alto nivel científico y tecnológico en lo relacionado con la detección de fallas o defectos en componentes estructurales. En consecuencia, deja de ser una simple curiosidad científica para convertirse en una poderosa herramienta utilizada en el estudio de materiales, permitiendo así extender su aplicación a campos como: la medicina, la ingeniería, la aeronáutica, etc. ^[8].

Durante la Segunda Guerra Mundial, los ingenieros alemanes y soviéticos se dedicaron a desarrollar equipos de inspección ultrasónica para aplicaciones militares, empleando un emisor y un receptor (técnica de transmisión) en la realización de los ensayos ^[8].

En la década del 40, el Dr. Floyd Firestone logra desarrollar el primer equipo que utiliza un mismo palpador como emisor y receptor, basando su técnica de inspección en la propiedad característica del sonido para reflejarse a partir de una interfase acústica. Es así como nace la técnica de inspección de pulso eco; esta nueva opción le permitió al ultrasonido competir y en muchas ocasiones superar las limitaciones técnicas de la radiografía, pues facilitó la inspección de piezas de gran espesor, o de aquellas que eran accesibles por un solo lado ^[8].

El perfeccionamiento del instrumento de inspección por ultrasonido se debe principalmente a los investigadores alemanes Josef y Herbert Krautkramer, quienes desde 1948 se dedican desarrollar y mejorar los equipos de inspección ultrasónica ^[8].

Los equipos de ultrasonido que se emplean actualmente permiten detectar discontinuidades superficiales o internas, dependiendo del tipo de palpador utilizado y de las frecuencias que se seleccionen dentro del rango de 0.1 a 50 MHz.

Por otra parte, hoy en día se cuenta con una infinidad de variantes en la inspección ultrasónica, y cada una de ellas ha sido desarrollada para detectar un tipo particular de discontinuidad, o para inspeccionar diferentes materiales.

1.6.1 Fundamentos del Ultrasonido Industrial.

El Ultrasonido Industrial (UT) se define como una técnica de Evaluación no Destructiva de carácter básicamente mecánico, que utiliza energía acústica de alta frecuencia para realizar análisis y determinar la integridad estructural de los materiales de ingeniería, a través de las medidas que se pueden tomar de ella ^{[8], [10] y [11]}.

Por ser una técnica de amplia cobertura, el Ultrasonido industrial es muy utilizado en control de calidad e inspección de materiales, en todos aquellos ámbitos de la actividad industrial en los que la calidad de los productos y la seguridad de estructuras, instalaciones, o personas, están implicadas. Así, son clásicas las aplicaciones en aeronáutica (revisión de estructuras aerodinámicas, motores, etc.), centrales nucleares (revisión de elementos críticos, soldaduras, etc.), transportes ferroviarios (detección de grietas en ruedas, soldaduras, etc.), exploración y distribución del petróleo (oleoductos, columnas de perforación, etc.), industria química (tuberías, válvulas, reactores, etc.), siderúrgica (control de calidad de planchas, perfiles, etc.), naval (inspección de estructuras), aeroespacial y todas aquellas en las que se requiera un alto grado de fiabilidad para su buen funcionamiento ^[11].

La técnica del Ultrasonido Industrial (UT) se basa en la generación, propagación y detección de ondas acústicas (ultrasonido) a través de los materiales mediante la utilización de palpadores que se acoplan al material. Un sistema típico de UT consta de varias unidades funcionales tales como: el pulsor/receptor, el transductor, y los dispositivos de visualización. El pulsor/receptor es un dispositivo electrónico que puede producir un pulso de voltaje. Excitado por el pulsor, el transductor que es un elemento piezoeléctrico capaz de convertir pulsos de voltaje en pequeñas vibraciones, genera energía acústica con frecuencias en el rango de los MHz; esta energía se propaga en forma de onda a través de los materiales. Cuando existe una discontinuidad (tal como una grieta) en la trayectoria de la onda, parte de la energía se refleja desde la superficie del defecto; la señal reflejada es transformada en señal eléctrica por el transductor y detectada por un instrumento. En la figura 1.1, se observa, la potencia de la señal reflejada con respecto al tiempo de generación del pulso hasta el momento en el cual se recibe el eco. El tiempo que toma la señal en viajar se relaciona directamente con la distancia recorrida y en ocasiones se logra obtener información adicional sobre la localización, el tamaño, la orientación y otras características del defecto ^{[10] y [12]}.

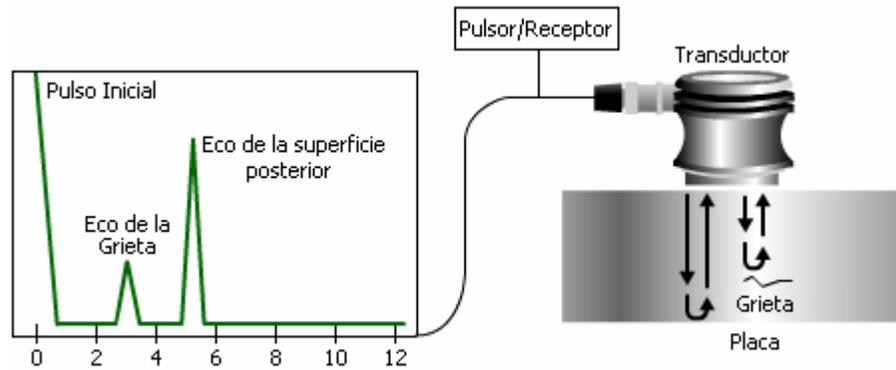


Fig. 1.1 Configuración típica de la técnica ultrasónica del pulso/eco.

Las vibraciones mecánicas se propagan en forma de ondas elásticas a través del material hasta que se atenúan por completo, si las dimensiones del medio son lo suficientemente grandes. Si, por el contrario en su recorrido alcanzan el límite del material o una interfase es decir, algún otro material sólido, líquido o gaseoso, las ondas pueden sufrir reflexión, refracción y distorsión, razón por la cual se producen cambios en sus parámetros y condiciones de propagación ^[12].

En el proceso de evaluación no destructiva por ultrasonido las dos técnicas más utilizadas son ^[11]:

- ☆ **Transmisión:** En esta técnica, un transductor piezoeléctrico emite cortos pulsos ultrasónicos de aproximadamente $1\mu s$ de duración, los cuales se transmiten a través del material que está siendo inspeccionado, cuya frecuencia de resonancia se sitúa entre 0,1 MHz y 50 MHz. En el otro extremo del material, un transductor similar recibe la señal ultrasónica y la transforma en señal eléctrica. Las características de la atenuación y los cambios de velocidad encontrados en el medio por el que se ha propagado la señal, proporcionan información respecto a la estructura interna del material (presencia de grietas, oclusiones, falta de homogeneidad, etc.).
- ☆ **Pulso-eco:** Mediante este procedimiento un único transductor hace las veces de emisor y receptor. En este caso la señal recibida es una superposición de señales reflejadas o ecos originados en las discontinuidades del material inspeccionado. De la amplitud, forma y posición de estos ecos se deduce la información acerca de la presencia de defectos, y características internas del material.

La utilización de una u otra técnica depende de la aplicación y de la cantidad de información que se desee extraer de los datos experimentales; la técnica Pulso-eco tiene ventajas sobre la de Transmisión, pero demanda un mayor costo. Así, a partir del origen del eco, se determina la profundidad de un defecto; de su amplitud, de su tamaño y orientación, y de su forma, se deducen otras características ^[11].

Por ejemplo, al emitir una señal de alta frecuencia en el rango de 1 a 5 MHz y medir la diferencia de tiempo entre los viajes de ida y vuelta de la señal reflejada en la interfase por cambio de medio (aire, agua u otro material) con la ayuda de un contador de tiempo como

el osciloscopio, se puede calcular el espesor del material o medio en el cual se desplazó la señal ultrasónica.

En consecuencia, la técnica del ultrasonido permite determinar con suficiente precisión ciertas características de los materiales tales como ^[12]:

- ☆ Velocidad de propagación de ondas.
- ☆ Parámetros y propiedades físicas como: tamaño de grano en metales, constantes elásticas, estructura interna, etc.
- ☆ Detección y caracterización de discontinuidades (grietas, poros, laminaciones, etc.)
- ☆ Adhesión entre materiales.
- ☆ Inspección de soldaduras.
- ☆ Medición de espesores de pared, extensión y grado de corrosión etc.

Además de lo anterior, el UT ha tenido gran aceptación en la aplicación de nuevos materiales como son los metales cerámicos y los materiales compuestos, por lo sencillo y fácil de aplicar como método de inspección para el control de calidad ^[8].

El Ultrasonido Industrial es una técnica de END ampliamente difundida en la evaluación de materiales metálicos y no metálicos, con la cual es posible obtener amplia información de la estructura interna del material en cuestión. Sin embargo, esta técnica es más compleja en la práctica, lo que demanda de personal calificado para su aplicación e interpretación de resultados; las nuevas tendencias indican que su campo de aplicación se mejorará con el apoyo de los computadores para el análisis inmediato de la información obtenida ^{[8] y [12]}.

1.6.2 Ventajas y Limitaciones.

1.6.2.1 Ventajas.

El desarrollo creciente del método de inspección por ultrasonido, esta respaldado con los diferentes aspectos que hacen la diferencia y establecen la ventaja frente a otras técnicas ^{[7] y [10]}:

- ☆ Se detectan discontinuidades superficiales e internas.
- ☆ Alta velocidad en la aplicación de sistemas automatizados de inspección.
- ☆ Posibilidad de obtener suficientes datos bajo diversas condiciones de medición.
- ☆ Inspección de grandes espesores de material dada la alta capacidad de penetración de las ondas ultrasónicas.
- ☆ Buena sensibilidad, lo cual permite la detección de defectos extremadamente pequeños.
- ☆ Alta precisión al determinar cambios finos (posición, tamaño, orientación y forma de defectos) en las estructuras especialmente las metalúrgicas.
- ☆ Necesidad de una sola superficie del material para hacer la evaluación del mismo.
- ☆ Interpretación fácil, rápida y confiable de los resultados mediante formulas y algoritmos

- probados y procesados directamente a través de un computador.
- ☆ Análisis detallado de los fenómenos acústicos involucrados.
 - ☆ Técnica exenta de riesgos y peligros en su aplicación tanto para los materiales o cuerpos de estudio, como para el operario evaluador.
 - ☆ Facilidad en la adecuación y adaptación de los equipos según las condiciones y circunstancias en que se realice la evaluación.
 - ☆ Dispositivos ultrasónicos y electrónicos de alta sensibilidad y capacidad para detectar las señales de emisión y respuesta en un sistema de aplicación ultrasónica.

1.6.2.2 Limitaciones.

Como todos los métodos de END, la evaluación ultrasónica también tiene sus limitaciones, que incluyen ^[8] y ^[10]:

- ☆ Está limitada por la geometría, estructura interna, espesor y acabado superficial de los materiales sujetos a inspección.
- ☆ Localiza mejor aquellas discontinuidades que son perpendiculares al haz de sonido, es decir, los defectos lineales orientados paralelamente al haz ultrasonoro pueden pasar desapercibidos.
- ☆ Las partes pequeñas o delgadas son difíciles de inspeccionar por este método.
- ☆ Los materiales que son ásperos, irregulares en la forma, muy pequeños, excepcionalmente finos o no homogéneos son difíciles de examinar.
- ☆ El hierro fundido y otros materiales de grano grueso son difíciles de examinar debido a la baja transmisión acústica y al alto ruido de la señal.
- ☆ El equipo puede tener un costo elevado, que depende del nivel de sensibilidad y de sofisticación requerido.
- ☆ El personal debe estar calificado y generalmente requiere de mucho mayor entrenamiento y experiencia para este método, que para cualquiera de los otros métodos de inspección.
- ☆ La interpretación de las indicaciones requiere de mucho entrenamiento y experiencia de parte del operador.
- ☆ Normalmente requiere de un medio de acople para realizar la transferencia de la energía acústica al interior de la muestra de prueba.
- ☆ Requiere de patrones de referencia tanto para la calibración del equipo, como para la caracterización de los defectos y generalmente, no proporciona un registro permanente.

En este capítulo se intentó proporcionar una introducción simplificada a los métodos de evaluación no destructiva utilizados en el control de calidad. Sin embargo, dado que el diseño a desarrollar esta enmarcado dentro de la técnica de END denominada ultrasonido Industrial, se hace necesario conocer mucho más sobre el método. Por lo tanto los capítulos siguientes presentan la información sobre la ciencia implicada en la evaluación ultrasónica, algunas de las técnicas de evaluación más utilizadas, los equipos que comúnmente se utilizan.

2. FISICA DEL ULTRASONIDO

2.1 INTRODUCCION.

La técnica del Ultrasonido Industrial se basa en las deformaciones o vibraciones mecánicas variables en el tiempo que sufre un material, fenómeno conocido como *acústica*. Todos los materiales están compuestos por átomos que pueden ser forzados a realizar movimientos vibratoriales alrededor de sus posiciones de equilibrio, generando ondas mecánicas cuando se mueven al unísono. Si un material es sometido a una tensión o compresión dentro de su límite de elasticidad, sus partículas individuales realizan oscilaciones elásticas, desplazándose de sus posiciones de equilibrio y quedando bajo el dominio de las fuerzas internas de restauración (fuerzas electrostáticas). Estas fuerzas de restauración elásticas entre partículas combinadas con la inercia de las mismas, conducen a los *movimientos oscilatorios* del medio. En un movimiento oscilatorio hay propagación de energía pero no de materia ^{[13] y [14]}.

Cuando una vibración mecánica se propaga por un medio material y llega a un receptor con la capacidad de producir en él una sensación auditiva, se dice que es una vibración acústica. Las vibraciones acústicas con frecuencias en el rango de los 20 Hz a los 20 KHz (rango auditivo) son conocidas como **Sonidos**; sin embargo, los fenómenos acústicos incluyen también a los **Ultrasonidos**, que son vibraciones mecánicas con frecuencias superiores a los 20 KHz, y a los **Infrasónicos** con frecuencias de vibración que se ubican por debajo de los 20 Hz. De esta forma se constituye el espectro acústico que se observa en la figura 2.1; donde el rango ultrasónico se subdivide en ultrasonido de: baja frecuencia, convencional y de alta frecuencia ^{[15], [16], [17] y [2]}.

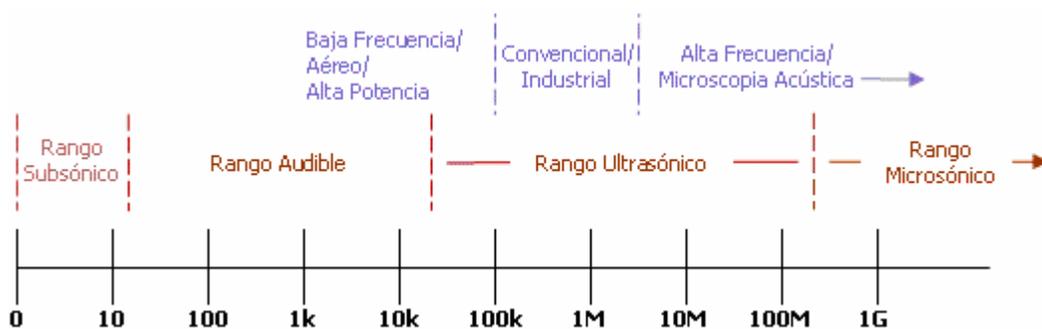


Fig. 2.1 Espectro acústico.

Como se puede observar de la figura anterior, las cuatro ramas de la ciencia encargadas del estudio del espectro acústico son ^{[18] y [2]}:

- ☆ La infrasónica o subsónica de 1 Hz a 20 Hz.
- ☆ La sónica o audible de 20 Hz a 20 KHz.

- ☆ La ultrasónica de 20 KHz a 500 MHz.
- ☆ La microsónica de 500 Mhz a 1 THz

Aunque todas las vibraciones mecánicas que tienen frecuencias superiores a los 20 KHz son consideradas como ultrasonido, el rango de frecuencia generalmente utilizado en la técnica de END y medida de espesores por ultrasonido Industrial, es de 100 KHz a 50 MHz aproximadamente ^[17].

Las vibraciones ultrasónicas presentan una característica que las hace extraordinariamente útiles en la evaluación no destructiva de materiales: cuando viajan por un medio cualquiera, se reflejan y generan ecos al encontrar alguna discontinuidad o sustancia extraña dentro de su trayectoria, los ecos son recogidos y analizados para descubrir la causa que los origina. Este fenómeno se debe a que, si bien el ultrasonido se comporta de manera similar al sonido audible, tiene una longitud de onda mucho más corta ^{[16] y [17]}.

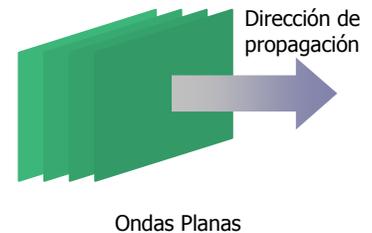
2.2 CLASIFICACIÓN DE LAS ONDAS ACÚSTICAS.

Las ondas acústicas de interés en el Ultrasonido Industrial se clasifican teniendo en cuenta la forma geométrica de la onda y el modo de propagación.

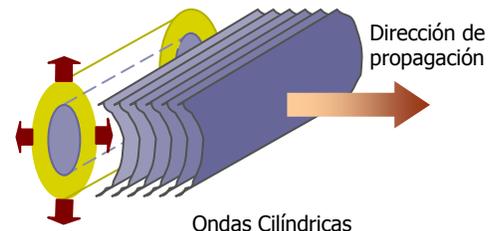
2.2.1 Forma geométrica de la onda.

Según la forma geométrica de las ondas acústicas, estas se pueden clasificar en ondas planas, ondas cilíndricas y ondas esféricas ^{[14] y [15]}.

- ☆ **Ondas planas:** Son quizá el ejemplo más simple de una onda tridimensional, pues los frentes de onda de cualquier onda divergente en un medio homogéneo se vuelven casi planos lejos de la fuente, lo que permite asumir que las propiedades de las ondas divergentes son a grandes distancias, muy similares a las propiedades de las ondas planas. La propiedad característica de las ondas planas es que cada variable acústica (desplazamiento de partícula, densidad, intensidad, presión, etc.) tiene una amplitud constante en cualquier plano perpendicular a la dirección de propagación. Es de anotar que, las ondas planas se desplazan en una sola dirección y transmiten la vibración en el mismo instante a todas las partículas del plano ^{[15], [19] y [20]}.

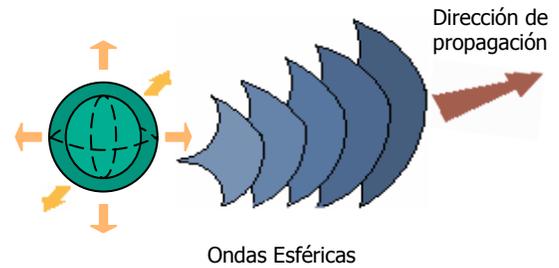


- ☆ **Ondas cilíndricas:** Son ondas producidas por fuentes que tienen forma cilíndrica, cuya superficie vibra y perturba el medio, generando frentes de onda con superficies cilíndricas paralelas a la fuente. Este tipo de ondas se



caracterizan porque la intensidad decrece con la distancia a la fuente ($I \propto \frac{1}{r}$) [14] y [15].

☆ **Ondas esféricas:** Son producidas por fuentes que tiene forma esférica o por partículas que transmiten su vibración en todas las direcciones; los frentes de onda están formados por esferas concéntricas y se caracterizan porque su intensidad decrece con el cuadrado de la distancia a la fuente ($I \propto \frac{1}{r^2}$) [14] y [15].



2.2.2 Modos de propagación de las ondas.

La propagación de una onda acústica al igual que la propagación de toda vibración mecánica, requiere de un medio elástico (gas, líquido o sólido) donde existan fracciones de materia (átomos o moléculas) capaces de vibrar [18].

En el aire, una onda acústica viaja por compresión y rarefacción de las moléculas en la dirección del desplazamiento de las moléculas. Sin embargo, en los sólidos, las moléculas pueden soportar vibraciones en otras direcciones, por lo que se hacen posibles diferentes modos de propagación de las ondas acústicas. Los cuatro modos principales se basan en la forma en que oscilan las partículas y se conocen como: ondas longitudinales, ondas transversales (de cizalla), ondas de Rayleigh (ondas de superficie), y ondas de Lamb (ondas laminares o de placas) en materiales delgados [13] y [21].

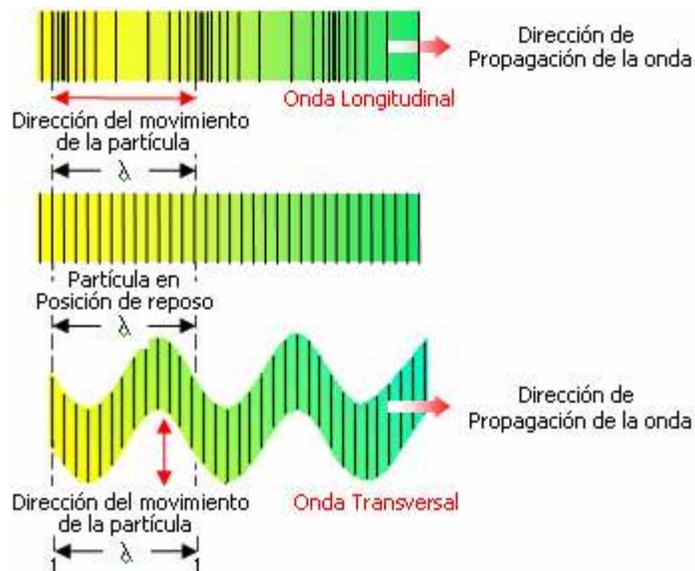
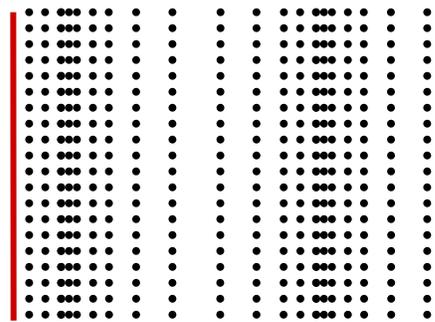


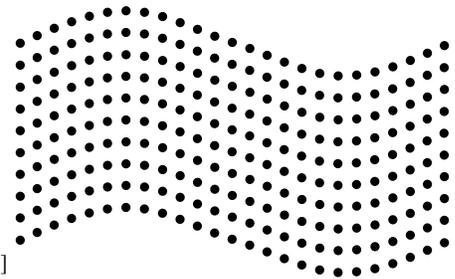
Fig. 2.2 Propagación de las ondas longitudinales y transversales

Las ondas longitudinales y transversales son los dos modos de propagación más utilizados en la técnica de evaluación no destructiva por ultrasonido. El movimiento de las partículas responsable de la propagación de las ondas longitudinales y transversales se ilustra en la figura anterior ^[13].

En **ondas longitudinales**, las oscilaciones ocurren en la dirección de propagación de la onda. Las ondas longitudinales son conocidas también como *ondas de presión* o *compresión*, debido a la presencia de fuerzas de compresión y rarefacción; además, se les denomina *ondas de densidad*, porque la densidad de partículas varía con el movimiento. Este tipo de ondas se puede generar en materiales líquidos y sólidos, dado que la energía viaja por la estructura atómica de estos materiales a través de una serie de movimientos de compresión y rarefacción ^[13].



En **ondas transversales**, las partículas oscilan perpendicularmente a la dirección de propagación. Las ondas transversales requieren de un material sólido para una óptima propagación; luego, en materiales líquidos o gaseosos esta propagación no es la mejor. Estas ondas son relativamente débiles comparadas con las ondas longitudinales, pues generalmente se utiliza un poco de energía de las ondas longitudinales para su generación ^[13].



Existen otras ondas que también son útiles en la evaluación ultrasónica, y son generadas por vibraciones elípticas o complejas de las partículas en superficies e interfaces de materiales expuestos a algún tipo de perturbación mecánica. Algunas de ellas son: las ondas de Rayleigh y las ondas de Lamb ^[21].

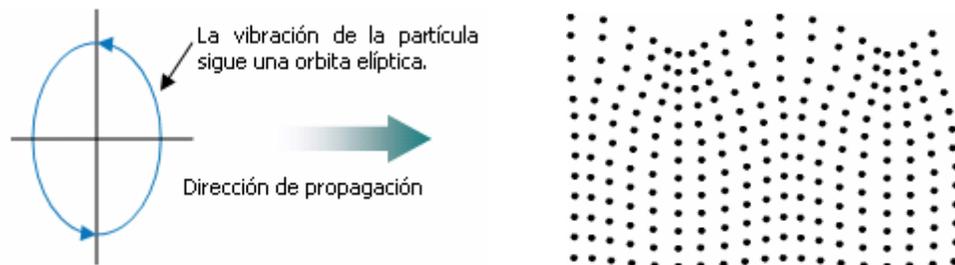
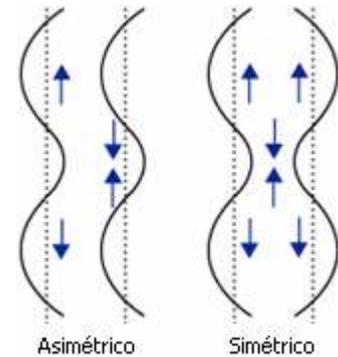


Fig. 2.3 Órbita y movimiento de una onda de Rayleigh

Las **ondas Rayleigh** viajan a través de superficies planas o curvadas de un material sólido relativamente grueso, penetrando una profundidad aproximada de una longitud de onda y realizando un movimiento longitudinal y transversal, donde cada molécula ejecuta una elipse conforme la onda pasa (figura 2.3); su longitud de onda es muy corta comparada con el espesor del material por el cual viaja. Las ondas de Rayleigh tienen una velocidad

aproximada del 90 a 95 % de la velocidad de una onda transversal en el mismo material, y son útiles, debido a que son muy sensibles a los defectos y fracturas superficiales; además, se pueden utilizar para examinar áreas curvadas a las que otras ondas pueden tener difícil acceso ^{[2] y [21]}.

Las **ondas de Lamb** son ondas vibratorias complejas que viajan a través de todo el espesor de un material y, solo se pueden propagar en metales muy delgados (espesores del orden de una longitud de onda); por lo que, son las ondas laminares más comúnmente utilizadas en la END. La propagación de estas ondas depende de la densidad, y de las propiedades mecánicas del material, y son afectadas por muchos factores como: la frecuencia seleccionada y el espesor del material mismo. En las ondas de Lamb, el movimiento complejo de las partículas es similar al de las ondas de Rayleigh (orbitas elípticas), y esta conformado por la superposición de un par de ondas transversales con un par de ondas longitudinales, cuya dirección de propagación se sitúa en el plano perpendicular a la superficie de la placa. A causa de la interferencia resultante se hacen posibles varios modos de vibración de las partículas, pero los dos más conocidos son el modo simétrico y el modo asimétrico ^{[21] y [22]}.



La tabla 2.1 hace una relación de los cuatro tipos de ondas ultrasónicas analizados y su aplicabilidad ^[2].

Tipo de Onda	Gas	Líquido	Sólido	Movimiento de la partícula	Aplicación
Longitudinal	Si	Si	Si	Compresión y rarefacción a lo largo del eje de propagación.	Detección de defectos y mediciones.
Transversal	No	No (excepto, pequeña película)	Si	Desplazamiento de la partícula perpendicular al eje de propagación	Detección de defectos, soldaduras, y resonancias.
Rayleigh	No	No	Si (sólo superficie)	Elipses, se atenúan rápido por debajo de la superficie.	Detección de defectos superficiales en zonas de difícil acceso.
Lamb	No	No	Si	Elipses, transmisión de onda guiada	Lámina y barras delgadas.

Tabla 2.1. Características y aplicación de las ondas Ultrasónicas

2.3 ECUACION DE ONDA

Dado que toda técnica de Evaluación no Destructiva (END) a base de Ultrasonido involucra fenómenos asociados con el movimiento de las ondas acústicas, fenómenos tales como: generación de ondas de presión dentro de un fluido, transmisión de ondas de presión

dentro de un sólido en forma de ondas elásticas, dispersión de estas ondas elásticas por los defectos que puedan encontrar dentro de la trayectoria de su movimiento, etc., se hace necesario el desarrollo de las ecuaciones que rigen las ondas de presión dentro de un fluido, y las ondas de presión elásticas dentro de un sólido ^[23].

2.3.1 Ecuación de movimiento para un medio fluido

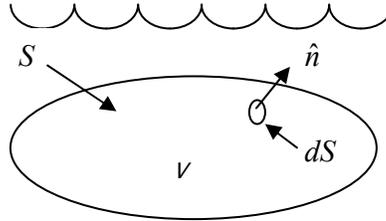


Fig. 2.4 Volumen arbitrario V en un fluido ideal

Sea un volumen V de un fluido compresible ideal (figura 2.4). Si $p(x,t)$ es la presión de este fluido en cualquier punto x y tiempo t , y se relacionan las fuerzas que actúan en el volumen V y en la superficie S del fluido con la razón de cambio del momento o cantidad de movimiento, se obtiene ^[23]:

$$\int_V \vec{f}(x,t) dV(x) - \int_S p(x_S,t) \hat{n}(x_S) dS(x_S) = \int_V \rho(x,t) \vec{a}(x,t) dV(x) \quad (2.1)$$

donde;

- $\vec{f}(x,t)$ \equiv fuerza de cuerpo.
- x_S \equiv punto arbitrario en la superficie S del volumen V .
- \hat{n} \equiv vector unitario que representa la normal.
- $\rho(x,t)$ \equiv densidad del fluido.
- $\vec{a}(x,t)$ \equiv aceleración de las partículas dentro del fluido

Aplicando el teorema de la divergencia al término $-\int_S p(x_S,t) \hat{n}(x_S) dS(x_S)$, se tiene que ^[23]:

$$-\int_S p(x_S,t) \hat{n}(x_S) dS(x_S) = -\int_V \nabla p(x,t) dV(x) \quad (2.2)$$

donde;

- ∇ \equiv operador gradiente

Luego la ecuación (2.1) toma la forma:

$$\int_V \vec{f}(x,t) dV(x) - \int_V \nabla p(x,t) dV(x) = \int_V \rho(x,t) \vec{a}(x,t) dV(x) \quad (2.3)$$

ó

$$\int_V \vec{f}(x,t)dV(x) - \int_V \nabla p(x,t)dV(x) - \int_V \rho(x,t)\vec{a}(x,t)dV(x) = 0 \quad (2.4)$$

Factorizando la ecuación 2.4 en términos del diferencial de volumen se obtiene:

$$\int_V [\vec{f}(x,t) - \nabla p(x,t) - \rho\vec{a}(x,t)]dV(x) = 0 \quad (2.5)$$

La igualdad expresada en la ecuación 2.5, se debe cumplir para un volumen arbitrario V , de tal forma que el integrando mismo debe tender a cero en cada punto x dentro del fluido, por lo que se llega a la ecuación diferencial:

$$-\nabla p(x,t) + \vec{f}(x,t) - \rho\vec{a}(x,t) = 0 \quad (2.6)$$

ó

$$-\nabla p(x,t) + \vec{f}(x,t) = \rho\vec{a}(x,t) \quad (2.7)$$

En las ecuaciones 2.6 y 2.7 se puede observar que todos sus términos dependen de las mismas variables de campo x y t , por lo que ellas se pueden omitir sin que se altere la estructura de la ecuación. Así la ecuación 2.7 se transforma en:

$$-\nabla p + \vec{f} = \rho\vec{a} \quad (2.8)$$

Como todas las ondas acústicas involucradas en las aplicaciones de END presentan velocidades y desplazamientos muy pequeños, se puede asumir que la densidad ρ es igual a la densidad en estado de equilibrio ρ_0 , y la aceleración $a = \partial^2 u / \partial t^2$, donde u es el vector desplazamiento. Bajo estas condiciones la ecuación 2.8 toma la forma:

$$-\nabla p + \vec{f} = \rho_0 \frac{\partial^2 \vec{u}}{\partial t^2} \quad (2.9)$$

Si se aplica el operador divergencia a ambos lados de la ecuación 2.9, se tiene:

$$\nabla \cdot (-\nabla p) + \nabla \cdot \vec{f} = \nabla \cdot \left(\rho_0 \frac{\partial^2 \vec{u}}{\partial t^2} \right) \quad (2.10)$$

ó

$$-\nabla^2 p + \nabla \cdot \vec{f} = \rho_0 \frac{\partial^2}{\partial t^2} (\nabla \cdot \vec{u}) \quad (2.11)$$

Para transformar la ecuación diferencial de movimiento (ecuación 2.11) en una ecuación de una sola variable tal como la presión, se relaciona la presión p y el vector desplazamiento \vec{u} a través de las propiedades materiales del fluido; esta relación se conoce como *ecuación*

constitutiva. Para un fluido compresible ideal, la presión es proporcional a la divergencia del vector desplazamiento, también conocida como *dilatación del fluido*, esto es ^[23]:

$$p = -K(\nabla \cdot \vec{u}) \quad (2.12)$$

donde;

$K \equiv$ constante de proporcionalidad conocida como *modulo de volumen del fluido*.

Despejando el término $\nabla \cdot \vec{u}$ de la ecuación 2.12, y reemplazándolo en la ecuación 2.11, se obtiene:

$$-\nabla^2 p + \nabla \cdot \vec{f} = \rho_0 \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left(-\frac{p}{K} \right) \quad (2.13)$$

ó

$$-\nabla^2 p + \nabla \cdot \vec{f} = -\frac{\rho_0}{K} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (2.14)$$

Multiplicando por (-1) e igualando a cero se obtiene la siguiente relación:

$$\nabla^2 p - \nabla \cdot \vec{f} - \frac{\rho_0}{K} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0 \quad (2.15)$$

Al hacer que $-\nabla \cdot \vec{f} = f$, $\frac{\rho_0}{K} = \frac{1}{c^2}$ y $c = \sqrt{\frac{K}{\rho_0}}$, donde f es un término escalar conocido como *fuerza de cuerpo*, y c una cantidad conocida como *velocidad del sonido en el fluido*; la ecuación (2.15) se puede reescribir de la forma ^[23]:

$$\nabla^2 p - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} + f = 0 \quad (2.16)$$

A esta ecuación se le conoce como: *ecuación de onda tridimensional no homogénea para la presión* ^[23].

Si se asume que el disturbio tridimensional que viaja dentro del fluido varía en una sola dirección espacial x (por ejemplo, $p = p(x,t)$), y que $f=0$; la ecuación 2.16 se reduce a:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0 \quad (2.17)$$

Con lo que se obtiene la conocida *ecuación de onda unidimensional para la presión* o *ecuación de onda plana para la presión* ^[20].

2.3.2 Ecuación de movimiento para un medio sólido.

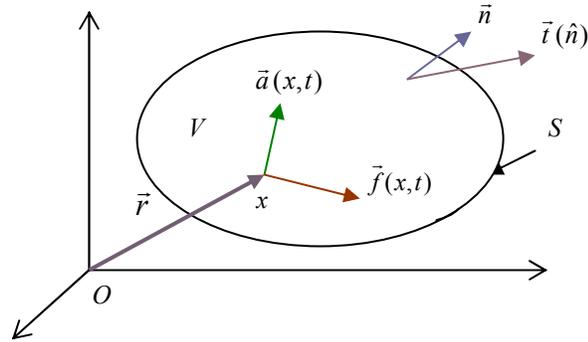


Fig. 2.5 Geometría de un sólido deformable

Sea un volumen V con superficie S de un cuerpo sólido continuo que se halla en movimiento en un instante t (figura 2.5.); sobre el cual actúan dos tipos de fuerzas: las fuerzas de volumen o fuerzas de cuerpo \vec{f} que ejercen su acción sobre todos los elementos de volumen que componen el cuerpo continuo y las fuerzas superficiales caracterizadas por el vector tensión $\vec{t}(\hat{n})$, que actúan sobre un elemento de superficie, ya sea una porción del contorno o una porción de superficie interna arbitraria ^{[23] y [24]}.

Aplicando al volumen V (o cualquier parte de este), el principio de conservación del momento lineal o segunda ley de Newton, que dice: “la variación de la cantidad de movimiento de una porción de un medio sólido continuo es igual a la resultante de las fuerzas que actúan sobre la porción considerada”; y asumiendo además que se cumple al menos la versión débil del principio de acción y reacción, se tiene ^{[23] y [24]}:

$$\int_S \vec{t}(\hat{n}) dS + \int_V \vec{f} dV = \int_V \rho \vec{a} dV \quad (2.18)$$

donde;

- $\vec{t}(\hat{n})$ \equiv tensión que actúa sobre S
- S \equiv superficie que limita el volumen V .
- \vec{f} \equiv fuerza de cuerpo (Fuerza / unidad de volumen) que actúa en V .
- ρ \equiv densidad.
- \vec{a} \equiv aceleración.

Relacionando la tensión $\vec{t}(\hat{n})$ con las tracciones a lo largo de las coordenadas planas \vec{t}_j por medio de la relación $\vec{t}(\hat{n}) = \vec{t}_j n_j$, la ecuación 2.18 se transforma en:

$$\int_S \vec{t}_j n_j dS + \int_V \vec{f} dV = \int_V \rho \vec{a} dV \quad (2.19)$$

Dado que en la ecuación 2.19 hay una integral de superficie que debe ser convertida a una integral de volumen, se hace necesario aplicar del teorema de Gauss para un tensor de primer orden (vector) que dice ^[23]:

$$\int_S \vec{v}_i n_i dS = \int_V \vec{v}_{i,i} dV$$

Luego, al aplicar este teorema a la integral de superficie se tiene:

$$\begin{aligned} \int_S \vec{t}_j n_j dS &= \int_V \vec{t}_{j,j} dV \\ &= \int_V \frac{\partial \vec{t}_j}{\partial x_j} dV \end{aligned}$$

donde;

$$\frac{\partial \vec{t}_j}{\partial x_j} = \nabla \cdot \vec{t} \quad \equiv \text{divergencia del campo vectorial } \vec{t}$$

Por lo anterior, la ecuación 2.19 se convierte en:

$$\int_V \frac{\partial \vec{t}_j}{\partial x_j} dV + \int_V \vec{f} dV - \int_V \rho \vec{a} dV = 0 \quad (2.20)$$

Al factorizar el diferencial de volumen en la ecuación anterior; esta toma la forma:

$$\int_V \left[\frac{\partial \vec{t}_j}{\partial x_j} + \vec{f} - \rho \vec{a} \right] dV = 0 \quad (2.21)$$

Como el volumen de integración es arbitrario, el $dV \neq 0$; luego, el integrando de la ecuación 2.21 se debe anular para cada punto x , con lo cual se cumple la igualdad anterior y se obtiene la siguiente ecuación diferencial:

$$\frac{\partial \vec{t}_j}{\partial x_j} + \vec{f} - \rho \vec{a} = 0 \quad (2.22)$$

ó

$$\frac{\partial \vec{t}_j}{\partial x_j} + \vec{f} = \rho \vec{a} \quad (2.23)$$

Las tensiones que puede experimentar un cuerpo sólido se pueden definir en términos del tensor de esfuerzos a través de la relación conocida como ecuación de Cauchy ^[24]:

$$\vec{t}_j = \tau_{ji} e_i \quad (2.24)$$

donde;

τ_{ji} \equiv tensor de esfuerzos.

j \equiv subíndice que indica la dirección de la normal de la cara sobre la cual actúa la fuerza.

i \equiv subíndice que indica la dirección de la fuerza.

Teniendo en cuenta esta consideración y expresando la fuerza del cuerpo \vec{f} y la aceleración \vec{a} en términos de sus componentes cartesianas: $\vec{f} = f_i \hat{e}_i$ y $\vec{a} = a_i \hat{e}_i$ respectivamente, la ecuación. 2.23 se transforma en ^[23]:

$$\frac{\partial \tau_{ji}}{\partial x_j} \hat{e}_i + f_i \hat{e}_i = \rho a_i \hat{e}_i \quad (2.25)$$

Dado que el tensor de esfuerzos es un tensor simétrico ($\tau_{ji} = \tau_{ij}$), se tiene ^[24]:

$$\frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \hat{e}_i + f_i \hat{e}_i = \rho a_i \hat{e}_i \quad (2.26)$$

De donde, al factorizar el vector unitario \hat{e}_i , se obtiene:

$$\frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + f_i = \rho a_i \quad (2.27)$$

Si se asume que el material elástico del cuerpo sólido es hiperelástico; se puede relacionar el tensor de esfuerzos con la función densidad de energía de deformación $u = u(e_{ij})$ en términos del tensor de deformación e_{ij} a través de la relación ^[23]:

$$\tau_{ij} = \frac{\partial u}{\partial e_{ij}} \quad (2.28)$$

De donde u se puede expandir en una serie de potencias en e_{ij} , respecto de un estado de referencia dado; esto es ^[23]:

$$u = A + B_{ij} e_{ij} + \frac{1}{2} C_{ijkl} e_{ij} e_{kl} \quad (2.29)$$

Si el estado de referencia tomado es un estado no esforzado y no deformado, se puede establecer que $A = 0$ y $B = 0$, por lo que la ecuación 2.29 se reduce a ^[23]:

$$u = \frac{1}{2} C_{ijkl} e_{ij} e_{kl} \quad (2.30)$$

donde;

C_{ijkl} \equiv tensor de cuarto orden que caracteriza las propiedades elásticas del medio, conocido como *tensor de constantes elásticas*.

Reemplazando u en la ecuación 2.28 se tiene:

$$\begin{aligned} \tau_{ij} &= \frac{\partial}{\partial e_{ij}} \left(\frac{1}{2} C_{ijkl} e_{ij} e_{kl} \right) \\ &= \frac{1}{2} C_{ijkl} \frac{\partial e_{ij}}{\partial e_{ij}} e_{kl} + \frac{1}{2} C_{ijkl} e_{ij} \frac{\partial e_{kl}}{\partial e_{ij}} \\ &= \frac{1}{2} C_{ijkl} \delta_{ij}^{ij} e_{kl} + \frac{1}{2} C_{ijkl} e_{ij} \delta_{ij}^{kl} \\ &= \frac{1}{2} C_{ijkl} \delta_{ij}^{ij} e_{kl} + \frac{1}{2} C_{ijkl} \delta_{ij}^{kl} e_{ij} \end{aligned}$$

donde,

$$\begin{aligned} C_{ijkl} \delta_{ij}^{ij} &= C_{ijkl} \delta_{ij}^{ij} \\ C_{ijkl} \delta_{ij}^{kl} &= C_{ijij} \delta_{ij}^{ij} \end{aligned}$$

luego;

$$\begin{aligned} \tau_{ij} &= \frac{1}{2} C_{ijkl} \delta_{ij}^{ij} e_{kl} + \frac{1}{2} C_{ijij} \delta_{ij}^{ij} e_{ij} \\ &= \frac{1}{2} \{ C_{ijkl} \delta_{ij}^{ij} e_{kl} + C_{ijij} \delta_{ij}^{ij} e_{ij} \} \\ &= \frac{1}{2} C_{ijkl} \{ \delta_{ij}^{ij} e_{kl} + \delta_{ij}^{ij} e_{kl} \} \\ &= \frac{2}{2} C_{ijkl} \delta_{ij}^{ij} e_{kl} \end{aligned}$$

De donde:

$$\tau_{ij} = C_{ijkl} e_{kl} \quad (2.31)$$

La relación expresada en la ecuación (2.31) se conoce como *ley de Hooke generalizada de la elasticidad lineal*, en términos del tensor de constantes elásticas C_{ijkl} ^[25].

El tensor de constantes elásticas C_{ijkl} tiene 81 componentes; sin embargo, debido a la simetría del tensor de esfuerzos, existen como máximo 36 componentes distintas y se puede

observar que el tensor C_{ijkl} también tiene propiedades de simetría respecto al intercambio de subíndices ^[23] y ^[24]:

$$C_{ijkl} = C_{jikl} = C_{ijlk} = C_{klij} \quad (2.32).$$

Con el objeto de escribir la ley de Hooke en función de las 36 componentes mencionadas anteriormente, se reemplaza el sistema de doble índice por un sistema de índice único con rango 6; por lo que se adopta la notación ^[24]:

$$\begin{aligned} \tau_{11} &= \tau_1 \\ \tau_{22} &= \tau_2 \\ \tau_{33} &= \tau_3 \\ \tau_{23} &= \tau_{32} = \tau_4 \\ \tau_{13} &= \tau_{31} = \tau_5 \\ \tau_{12} &= \tau_{21} = \tau_6 \end{aligned} \quad (2.33)$$

y

$$\begin{aligned} e_{11} &= e_1 \\ e_{22} &= e_2 \\ e_{33} &= e_3 \\ e_{23} &= e_{32} = e_4 \\ e_{13} &= e_{31} = e_5 \\ e_{12} &= e_{21} = e_6 \end{aligned} \quad (2.34)$$

Y se reescribe la ley de Hooke de la forma ^[24]:

$$\tau_k = C_{kl} e_l; \quad (k, l = 1, 2, \dots, 6) \quad (2.35)$$

donde;

C_{kl} \equiv representa las 36 constantes elásticas del medio ($6^2 = 36$).

Si las propiedades elásticas del medio sólido continuo son independientes del sistema de referencia utilizado para describirlas; es decir, si dichas propiedades elásticas no dependen de la dirección que se este considerando, se dice que el medio sólido continuo es elásticamente isotrópico; por el contrario, se tendrá un material anisotrópico ^[23].

Dado que las propiedades elásticas de un sólido Hookeano se expresan mediante los coeficientes C_{kl} , un cuerpo anisotrópico tendrá una matriz de constantes elásticas de la forma ^[24]:

$$C_{kj} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56} \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} \end{bmatrix} \quad (2.36)$$

Debido a la simetría del tensor de esfuerzos y a la existencia de la función densidad de energía de deformación, se puede observar que el tensor de constantes elásticas C_{kl} tiene propiedades de simetría ($C_{kl} = C_{lk}$); lo que reduce a 21 el número de constantes elásticas. Esto se puede interpretar como si hubiese un plano elástico de simetría en un punto, cuando las constantes elásticas tienen el mismo valor para cada par de sistemas coordenados que son la imagen especular uno del otro con respecto al plano; los ejes de tales sistemas coordenados se denominan “*direcciones elásticas equivalentes*” [24].

Para este caso en particular, se asume que el material es isotrópico; es decir, en un punto dado dentro del material la relación esfuerzo-deformación es independiente de la orientación de los ejes coordenados seleccionados y todos los planos son de simetría elástica; ahora si se tiene en cuenta que para un medio isotrópico las constantes elásticas son invariantes bajo cualquier transformación ortogonal de coordenadas se tiene que [23] y [24].

$$C'_{ijkl} = C_{ijkl} \quad (2.37)$$

Es decir, C_{ijkl} es un tensor isotrópico de cuarto orden el cual se puede escribir como [24]:

$$C_{ijkl} = \lambda' \delta_{ij} \delta_{kl} + \mu (\delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{il} \delta_{jk}) + k (\delta_{ik} \delta_{jl} - \delta_{il} \delta_{jk}) \quad (2.38)$$

donde;

λ' , μ y k \equiv son escalares que se deben elegir adecuadamente. Además de que λ' y μ son comúnmente conocidas como las *constantes de Lamé*.

Para la ecuación 2.38 se tiene que:

$$\begin{aligned} \lambda' \delta_{ij} \delta_{kl} &= \lambda' \delta_{ij} \delta_{kl} \\ \mu \delta_{ik} \delta_{jl} &= \mu \delta_{ik} \delta_{jl} \\ \mu \delta_{il} \delta_{jk} &= \mu \delta_{il} \delta_{jk} \\ k \delta_{ik} \delta_{jl} &= k \delta_{ii} \delta_{jj} \\ k \delta_{il} \delta_{jk} &= k \delta_{ii} \delta_{jj} \end{aligned}$$

Luego;

$$\begin{aligned}
C_{ijkl} &= \lambda' \delta_{ij} \delta_{kl} + \mu(\delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{il} \delta_{jk}) + k(\delta_{ii} \delta_{jj} - \delta_{ii} \delta_{jj}) \\
&= \lambda' \delta_{ij} \delta_{kl} + \mu(\delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{il} \delta_{jk}) + k(1 \cdot 1 - 1 \cdot 1) \\
&= \lambda' \delta_{ij} \delta_{kl} + \mu(\delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{il} \delta_{jk}) + k(1 - 1) \\
&= \lambda' \delta_{ij} \delta_{kl} + \mu(\delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{il} \delta_{jk}) + k(0)
\end{aligned}$$

De donde;

$$C_{ijkl} = \lambda' \delta_{ij} \delta_{kl} + \mu(\delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{il} \delta_{jk}) \quad (2.39)$$

Volviendo a la ecuación 2.31 y reemplazando en ella el tensor C_{ijkl} , se obtiene:

$$\begin{aligned}
\tau_{ij} &= [\lambda' \delta_{ij} \delta_{kl} + \mu(\delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{il} \delta_{jk})] e_{kl} \\
&= \lambda' \delta_{ij} \delta_{kl} e_{kl} + \mu \delta_{ik} \delta_{jl} e_{kl} + \mu \delta_{il} \delta_{jk} e_{kl}
\end{aligned}$$

donde;

$$\begin{aligned}
\delta_{ij} \delta_{kl} e_{kl} &= \delta_{ij} \delta_{kk} e_{kk} \\
\delta_{ik} \delta_{jl} e_{kl} &= \delta_{ii} \delta_{jj} e_{ij} \\
\delta_{il} \delta_{jk} e_{kl} &= \delta_{ii} \delta_{jj} e_{ji}
\end{aligned}$$

Luego:

$$\begin{aligned}
\tau_{ij} &= \lambda' \delta_{ij} \delta_{kk} e_{kk} + \mu \delta_{ii} \delta_{jj} e_{ij} + \mu \delta_{ii} \delta_{jj} e_{ji} \\
&= \lambda' \delta_{ij} \delta_{kk} e_{kk} + \mu [\delta_{ii} \delta_{jj} e_{ij} + \delta_{ii} \delta_{jj} e_{ji}] \\
&= \lambda' \delta_{ij} e_{kk} + \mu [e_{ij} + e_{ji}] \\
&= \lambda' e_{kk} \delta_{ij} + \mu [e_{ij} + e_{ji}]
\end{aligned}$$

Dado que e_{ij} y e_{ji} son tensores simétricos ($e_{ij} = e_{ji}$), se tiene:

$$\tau_{ij} = \lambda' \delta_{ij} e_{kk} + 2\mu e_{ij} \quad (2.40)$$

Ecuación conocida como *ecuación constitutiva de esfuerzo-deformación* ^[23].

Si a la ecuación 2.40 se le aplica la identidad ^[26]: $\delta_{ij} e_{kk} = \nabla \cdot \vec{u} = u_{j,i}$; ésta se convierte en:

$$\tau_{ij} = \lambda' u_{j,i} + 2\mu e_{ij} \quad (2.41)$$

Reemplazando la ecuación 2.41 en la ecuación 2.27, se obtiene:

$$\frac{\partial}{\partial x_j} [\lambda' u_{j,i} + 2\mu e_{ij}] + f_i = \rho a_i \quad (2.42)$$

Y asumiendo que todos los gradientes del desplazamiento y la velocidad son pequeños; cantidades como: deformación, velocidad, aceleración y densidad; se pueden escribir de la forma ^[23]:

$$\begin{aligned}
 e_{ij} &= \frac{1}{2} \{u_{i,j} + u_{j,i}\} = \frac{1}{2} \left\{ \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right\} \\
 v_i &= \frac{\partial u_i}{\partial t} \\
 a_i &= \frac{\partial v_i}{\partial t} = \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} \\
 \rho &= \rho_0
 \end{aligned} \tag{2.43}$$

donde,

$$\begin{aligned}
 e_{ij} &\equiv \text{tensor de deformación} \\
 v_i &\equiv \text{velocidad} \\
 a_i &\equiv \text{aceleración} \\
 \rho_0 &\equiv \text{densidad en estado de equilibrio}
 \end{aligned}$$

Luego de reemplazar las relaciones de la ecuación 2.43 en la ecuación 2.42 y realizar todo un proceso de factorización, se obtiene la famosa ecuación de Navier, para la cual se asume que el cuerpo es homogéneo, razón por la cual λ' y μ son independientes de \bar{x} ^[23].

$$\mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} + (\lambda' + \mu) \frac{\partial^2 u_j}{\partial x_j \partial x_i} + f_i = \rho_0 \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} \tag{2.44}$$

La ecuación de Navier también se puede escribir en notación vectorial de la forma ^[23]:

$$\mu \nabla^2 \vec{u} + (\lambda' + \mu) \nabla (\nabla \cdot \vec{u}) + \vec{f} = \rho_0 \frac{\partial^2 \vec{u}}{\partial t^2} \tag{2.45}$$

De igual manera, si se quiere obtener la ecuación vectorial de Navier en función de las velocidades longitudinal c_L y transversal c_T de la onda acústica, primero se asume que $\vec{f} = 0$ y se factoriza ρ_0 , en la ecuación 2.45 para obtener:

$$\frac{\mu}{\rho_0} \nabla^2 \vec{u} + \left(\frac{\lambda' + \mu}{\rho_0} \right) \nabla (\nabla \cdot \vec{u}) = \frac{\partial^2 \vec{u}}{\partial t^2} \tag{2.46}$$

Donde $\frac{\mu}{\rho_0} = c_T^2$ y $\left(\frac{\lambda' + \mu}{\rho_0} \right) = c_L^2 - c_T^2$; con lo que la ecuación 2.46 se convierte en ^{[22] y [23]}:

$$c_T^2 \nabla^2 \vec{u} + (c_L^2 - c_T^2) \nabla(\nabla \cdot \vec{u}) = \frac{\partial^2 \vec{u}}{\partial t^2} \quad (2.47)$$

Al utilizar la relación vectorial ^[23]:

$$\nabla^2 \vec{u} = \nabla(\nabla \cdot \vec{u}) - \nabla \times (\nabla \times \vec{u}) \quad (2.48)$$

Se tiene:

$$\begin{aligned} c_T^2 [\nabla(\nabla \cdot \vec{u}) - \nabla \times (\nabla \times \vec{u})] + (c_L^2 - c_T^2) \nabla(\nabla \cdot \vec{u}) &= \frac{\partial^2 \vec{u}}{\partial t^2} \\ c_T^2 [\nabla(\nabla \cdot \vec{u})] - c_T^2 [\nabla \times (\nabla \times \vec{u})] + c_L^2 [\nabla(\nabla \cdot \vec{u})] - c_T^2 [\nabla(\nabla \cdot \vec{u})] &= \frac{\partial^2 \vec{u}}{\partial t^2} \\ c_L^2 [\nabla(\nabla \cdot \vec{u})] - c_T^2 [\nabla \times (\nabla \times \vec{u})] &= \frac{\partial^2 \vec{u}}{\partial t^2} \end{aligned} \quad (2.49)$$

La ecuación (2.49) es la ecuación vectorial de Navier en función de las velocidades longitudinal y transversal de la onda acústica. Es importante aclarar que está ecuación no es en general la ecuación de onda, como la que se encontró para un medio fluido; sin embargo, para algunos movimientos especiales en una dimensión, la ecuación de Navier puede tener tres soluciones independientes y se reduce a una simple ecuación de onda común. Por ejemplo, si asume que el movimiento del medio elástico se realiza en función de x y t solamente y que el único componente de desplazamiento está en la dirección de x ; es decir $\vec{u} = u(x, t) \vec{e}_x$, se tiene que $\nabla \times \vec{u} = 0$ y la ecuación de Navier se convierte en ^[23]:

$$c_L^2 [\nabla(\nabla \cdot \vec{u})] = \frac{\partial^2 \vec{u}}{\partial t^2} \quad (2.50)$$

ó

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \frac{1}{c_L^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0 \quad (2.51)$$

Esta ecuación no es más que la conocida ecuación de onda unidimensional homogénea de ondas P , con soluciones dadas por $u = f(t - x/c_L)$ para perturbaciones que viajan en la dirección positiva del eje x ; estas perturbaciones no son más que ondas longitudinales con velocidad de propagación c_L . El movimiento de estas ondas se realiza totalmente en la dirección de propagación, como se observa en la figura 2.6 (a) ^[23].

Si por el contrario se asume que el vector desplazamiento tiene componentes sólo en las direcciones y ó z ; es decir $\vec{u} = v(x, t) \vec{e}_y$ ó $\vec{u} = w(x, t) \vec{e}_z$ respectivamente, se tiene que $\nabla \cdot \vec{u} = 0$, y la ecuación de Navier se reduce a ^[23]:

$$\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} - \frac{1}{c_{T_1}^2} \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = 0$$

$$\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - \frac{1}{c_{T_2}^2} \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = 0 \quad (2.52)$$

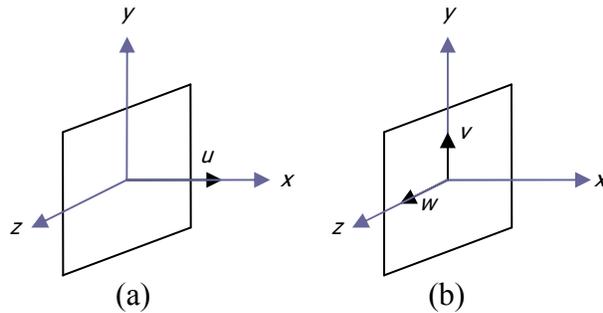


Fig. 2.6 (a) Propagación de una onda plana unidimensional (onda P); (b) propagación de ondas transversales planas unidimensionales con polarización vertical (SV) y con polarización horizontal (SH).

Estas ecuaciones tienen soluciones dadas por: $v = f(t - x/c_{T_1})$ y $w = f(t - x/c_{T_2})$, para perturbaciones que viajan en la dirección positiva del eje x ; estas perturbaciones son ondas transversales u ondas (S) con velocidades de propagación c_T que sólo difieren en sus direcciones de desplazamiento (o polarización). En el caso de las perturbaciones v , ellas representan ondas transversales polarizadas verticalmente (SV), mientras que las perturbaciones w representan ondas de transversales polarizadas horizontalmente (SH) (figura 2.6 (b)) [23].

2.4 PROPIEDADES DE UNA ONDA ACÚSTICA PLANA.

En un movimiento ondulatorio se propagan dos magnitudes físicas: **momento** y **energía**, es decir, no se propaga la materia sino su estado de movimiento [15].

Al hacer el análisis matemático de un movimiento ondulatorio se intenta describir el comportamiento de una onda que se desplaza a lo largo de un eje, y que idealmente lo hace sin deformación; razón por la cual, se ha escogido el modelo de una onda plana que se propaga en un material sólido homogéneo, isotrópico y perfectamente elástico, de tal forma que no haya disipación de la energía acústica. Bajo estas condiciones las propiedades de la onda son [14], [17], [18], [20] y [22].

- ☆ **Longitud de onda**, λ : distancia recorrida por la energía en un período y es igual a la distancia entre dos puntos consecutivos que tienen el mismo comportamiento físico. La longitud de onda tiene unidades de longitud.
- ☆ **Periodo**, T : tiempo empleado por la partícula para realizar una vibración completa, entendiendo como vibración completa el conjunto de valores que toma la partícula desde que se separa de la posición de equilibrio hasta que regresa a ella.

- ☆ **Amplitud**, A : máximo desplazamiento de una partícula desde su posición de equilibrio.
- ☆ **Frecuencia**, f : recíproco del período que se define como el número de oscilaciones en un segundo. Su unidad de medida es el Hertz, (Hz).
- ☆ **Velocidad de propagación o velocidad ultrasónica**, c : velocidad de transmisión de la energía sonora a través de un medio.

La siguiente figura muestra una onda senoidal que se propaga en la dirección del eje x y exhibe estas propiedades.

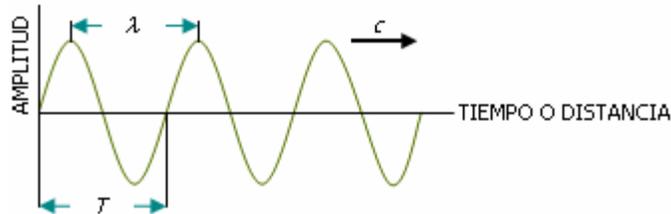


Fig. 2.7 *Propiedades básicas de una onda continua.*

La relación entre la frecuencia y el período de una onda continua se da en la ecuación:

$$f = \frac{1}{T} \quad (2.53)$$

A veces, es necesario utilizar el término frecuencia angular ω (o pulsante) en lugar de la frecuencia normal. La frecuencia angular se define como:

$$\omega = 2\pi f \quad (2.54)$$

Durante un solo período, T , la onda viaja a través de la distancia de una longitud de onda λ , a lo largo del eje de propagación. De donde se infiere que la velocidad ultrasónica se puede expresar a través de la ecuación:

$$c = \frac{\lambda}{T} \quad (2.55)$$

En la relación anterior, se observa que la longitud de onda es directamente proporcional a la velocidad de la onda e inversamente proporcional a la frecuencia de la misma; relación que se describe como:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2.56)$$

La región a través de la cual se desplazan las ondas ultrasónicas dentro de un material se conoce como **campo ultrasónico**. Y se puede determinar por medio de: el desplazamiento de la partícula, u , la velocidad de la misma, v , y la presión acústica, p ^[22].

El desplazamiento de la partícula u , para una onda plana en algún punto a lo largo del eje x , en un tiempo t se puede expresar como ^[22]:

$$u = u_0 \sin \left[\omega \left(t - \frac{x}{c} \right) \right] \quad (2.57)$$

Donde;

- u_0 \equiv amplitud del desplazamiento
- $[\omega(t - x/c)]$ \equiv ángulo fase
- x \equiv distancia del desplazamiento de la partícula.
- c \equiv velocidad de la onda acústica.

Para una onda plana que viaja en una dirección dada, la relación entre la presión acústica, p , y la velocidad de la partícula, v , se da por la expresión ^[22]:

$$\frac{p}{v} = \rho c \quad (2.58)$$

Donde;

- p \equiv presión acústica.
- v \equiv velocidad de la partícula.
- ρ \equiv densidad del medio.
- c \equiv velocidad de la onda acústica.

Adicional a las propiedades antes vistas, existe otra propiedad muy importante en el análisis de las ondas acústicas planas, esta es la **Intensidad acústica** I , que se define como: la cantidad de energía acústica que se transmite a través de una superficie con unidad de área, perpendicular a la dirección de propagación de la onda por unidad de tiempo y tiene unidades de W/m^2 . La siguiente ecuación representa la intensidad acústica ^[22] y ^[27]:

$$I = \frac{W}{S} \quad (2.59)$$

Donde;

- W \equiv potencia de la fuente.
- S \equiv área.

Para una onda plana senoidal, la intensidad de la onda se define como ^[22]:

$$I = \frac{1}{2} p_0 v_0 \quad (2.60)$$

Donde;

- p_0 \equiv amplitud de la presión acústica.
- v_0 \equiv amplitud de la velocidad de la partícula.

De la ecuación (2.58), se tiene que:

$$v_0 = \frac{p_0}{\rho c} \quad (2.61)$$

ó

$$p_0 = v_0 \rho c \quad (2.62)$$

Así, la ecuación (2.60) toma la forma:

$$I = \frac{p_0^2}{2\rho c} \quad (2.63)$$

ó

$$I = \frac{1}{2} v_0^2 \rho c \quad (2.64)$$

Como se vio en la sección de formas geométricas de las ondas, la intensidad acústica para ondas planas es independiente de la distancia; sin embargo, para el caso de ondas cilíndricas y esféricas, ésta decrece con relación a la distancia r de la fuente, según las ecuaciones ^[22]:

$$I = \frac{W}{2\pi r} \quad (2.65)$$

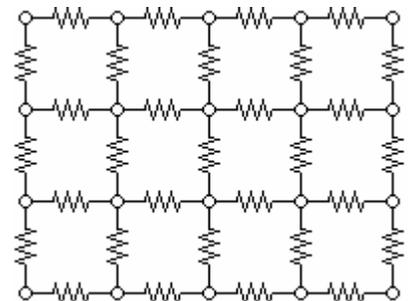
y

$$I = \frac{W}{4\pi r^2} \quad (2.66)$$

Las ecuaciones 2.65 y 2.66 definen la intensidad de una onda cilíndrica y la intensidad de una onda esférica respectivamente.

2.5 PROPAGACIÓN ACÚSTICA EN MATERIALES ELÁSTICOS.

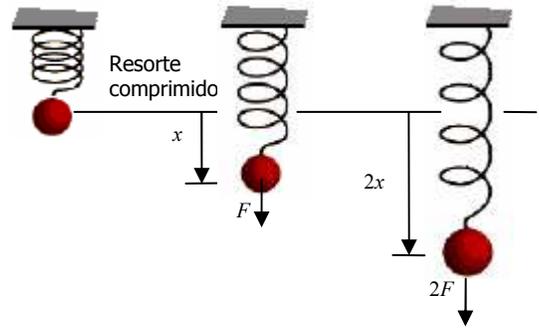
Dado que las ondas acústicas se propagan por medio de las vibraciones o los **movimientos oscilatorios** de las partículas dentro de un material, estas se pueden representar como un conjunto de masas o partículas oscilantes acopladas por medio de resortes **elásticos**. Cada partícula individual es afectada por el movimiento de su vecina más cercana, y actúan sobre ella la fuerza **inercial** y la fuerza **restauradora elástica** ^[27].



Dentro del límite de elasticidad de cualquier material, hay una relación lineal entre el desplazamiento de la partícula y la fuerza que intenta restaurarla a su posición de equilibrio. Esta dependencia lineal se describe a través de la **Ley de Hooke** ^[27].

En términos del modelo del oscilador armónico simple (sistema masa-resorte), la ley de Hooke dice: “la fuerza restauradora que ejerce un resorte es directamente proporcional a la deformación que sufre el resorte y actúa en sentido contrario”. La ley de Hooke se expresa por medio de la ecuación ^[27]:

$$F = -kx \quad (2.67)$$



Donde;

$F \equiv$ fuerza,

$k \equiv$ constante del resorte,

$x \equiv$ cantidad de desplazamiento de la partícula.

El sistema masa-resorte tiene una sola frecuencia angular determinada por su constante de resorte k y su masa m ; según la ecuación ^[20] y ^[27]:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2.68)$$

La constante del resorte se define como la fuerza restauradora del resorte por unidad de longitud, y su valor representa la medida de la rigidez del resorte; es decir, la constante del resorte identifica las características del mismo. La ecuación 2.68 es válida para un sistema de amortiguamiento bajo ^[27].

2.5.1 Velocidad del sonido

Algunas propiedades de la velocidad del sonido se pueden explicar utilizando la Ley de Hooke en conjunto con la Segunda Ley de Newton; dado que la velocidad del sonido dentro de un material es una función de las propiedades del material y es independiente de la amplitud de la onda acústica ^[27].

De la Segunda Ley de Newton se tiene que la fuerza aplicada a una partícula es proporcional al producto de su masa por su aceleración, y se expresa en la ecuación ^[27]:

$$F = m a \quad (2.69)$$

Así mismo, la Ley de Hooke dice que esta fuerza será igual a una fuerza de restauración en dirección opuesta que es dependiente de la constante del resorte y del desplazamiento ($F = -kx$). En consecuencia, dado que la fuerza aplicada y la fuerza de restauración son proporcionales, se puede escribir que:

$$-kx = ma \quad (2.70)$$

El signo negativo indica que la fuerza es aplicada en dirección opuesta a la deformación del resorte.

Puesto que la masa m y la constante del resorte k , son magnitudes constantes para cualquier material dado, se puede ver que la aceleración a y el desplazamiento x , son las únicas magnitudes variables, además de que son directamente proporcionales; luego, si el desplazamiento de la partícula aumenta, también lo hará su aceleración. Esto conlleva a que el tiempo que toma una partícula para moverse y retornar a su posición de equilibrio sea independiente de la fuerza aplicada. Así, dentro de un material dado el sonido viaja siempre a la misma velocidad no importa cuanta fuerza sea aplicada cuando otras variables, tales como la temperatura, se mantienen constantes ^[27].

2.5.2 ¿Qué propiedades del material afectan su velocidad acústica?

El sonido viaja a velocidades diferentes en materiales diferentes. Esto se debe a que la masa de las partículas atómicas y las constantes del resorte son distintas para cada material. La masa de las partículas se relaciona con la densidad del material, y la constante del resorte con las constantes elásticas del mismo material. La relación general entre la velocidad del sonido en un sólido, la densidad y las constantes elásticas se da por la ecuación ^[27]:

$$c = \sqrt{\frac{C_{ij}}{\rho}} \quad (2.71)$$

Donde;

c \equiv velocidad del sonido

C \equiv constante elástica

ρ \equiv densidad del material.

ij \equiv subíndices que indican la direccionalidad de las constantes elásticas respecto al tipo de onda, y a la dirección del recorrido de la misma.

Esta ecuación se puede transformar en otras ecuaciones diferentes, dependiendo del tipo de onda (longitudinal o transversal) y de las constantes elásticas que se utilicen. Las constantes elásticas típicas de los materiales sólidos incluyen ^{[22] y [27]}:

- ☆ **Módulo de Young**, Y : constante de proporcionalidad entre la tensión uniaxial y el esfuerzo.
- ☆ **Razón de Poisson**, σ : razón de la tensión radial a la tensión axial.
- ☆ **Módulo de volumen**, K : medida de la incompresibilidad de un cuerpo sujeto a una presión hidrostática.
- ☆ **Módulo de deformación o cizalla**, G : también llamado rigidez, mide la resistencia de una sustancia a la deformación.

☆ **Constantes de Lamé, λ' y μ :** constantes materiales que se derivan del módulo de Young y de la razón de Poisson, así:

$$\lambda' = \frac{Y\sigma}{(1+\sigma)(1-2\sigma)} \quad (2.72)$$

y

$$\mu = \frac{Y}{2(1+\sigma)} \quad (2.73)$$

En materiales isotrópicos, las constantes elásticas son iguales para todas las direcciones dentro del material, sin embargo, la mayoría de los materiales son anisotrópicos y las constantes elásticas difieren con cada dirección. Por ejemplo, en un pedazo de placa de aluminio enrollada, los granos que componen la estructura atómica del material, se alargan en una dirección y se comprimen en las otras direcciones por lo que, las constantes elásticas de la dirección longitudinal son distintas de las constantes elásticas de la dirección transversal ^[27].

Al momento de calcular la velocidad de una onda longitudinal, normalmente se utilizan el módulo de Young (Y) y la razón de Poisson (σ), obteniendo una ecuación de la forma ^[22] y ^[27]:

$$c_L = \sqrt{\left(\frac{Y(1-\sigma)}{\rho(1+\sigma)(1-2\sigma)}\right)} \quad (2.74)$$

Donde;

$c_L \equiv$ velocidad de una onda longitudinal

Cuando se calcula la velocidad de una onda transversal, se utiliza el módulo de deformación o cizalla, con lo cual la ecuación de la velocidad toma la forma ^[22] y ^[27]:

$$c_T = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (2.75)$$

Donde;

$c_T \equiv$ velocidad de una onda transversal

A menudo es más conveniente hacer los cálculos utilizando las constantes de Lamé; por lo que las ecuaciones 2.74 y 2.75, se transforman en ^[22]:

$$c_L = \sqrt{\left(\frac{\lambda'-2\mu}{\rho}\right)} \quad (2.76)$$

y

$$c_T = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (2.77)$$

Velocidad longitudinal y velocidad transversal respectivamente.

En la tabla 2.2 se hace una relación entre las velocidades de las ondas longitudinal, transversal y de Rayleigh, para algunos materiales [2].

Velocidades Ultrasonicas, 10 ⁵ cm/s						
Material	Tipo	Densidad (ρ) g/cm ³	V _L (m/s)	V _T (m/s)	V _R (m/s)	Impedancia acústica (Z _L), 10 ⁵ g/cm 10 ² s (a)
<i>Aceros Inoxidables</i>	302	7.9	5.66	3.12	3.12	4.47
	304 L	7.9	5.64	3.07	...	4.45
	347	7.91	5.74	3.10	2.80	4.54
	410	7.76	5.39	2.99	2.16	4.13
	430	7.7	6.01	3.36	...	4.63
<i>Aluminios</i>	1100 - O	2.71	6.35	3.10	2.97	1.72
	Aleación 2117 - T4	2.8	6.25	3.10	2.79	1.75
<i>Plomo</i>	Puro	11.34	2.16	0.70	0.64	2.45
	Duro (94Pb - 6Sb)	10.88	2.16	0.81	0.73	2.35
<i>No metales</i>	Aire	0.00129	0.331	...	...	0.00004
	Aceite (SAE 20)	0.87	1.74	...	...	0.150
	Aceite transformador	0.92	1.38	...	...	0.127
	Parafina	0.9	2.20	...	...	0.20
<i>Plásticos y otros materiales</i>	Teflón	2.2	1.35	...	...	0.30
	Cuarzo natural	2.65	5.73	...	...	1.52
	Caucho vulcanizado	1.1 - 1.6	2.30	...	...	0.25 - 0.37
<i>Agua</i>	Líquida (b)	1.0	1.49	...	...	0.149
	Hielo (c)	0.9	3.98	1.99	...	0.36

V_L ≡ velocidad de las ondas longitudinales; V_T ≡ velocidad de las ondas transversales. V_R ≡ velocidad de las ondas de Rayleigh. (a) Para ondas longitudinales Z_L=ρV_L. (b) A 4 °C. (c) A 0 °C.

Tabla 2. 2 Propiedades Acústicas de algunos materiales.

Al comparar las velocidades de las ondas longitudinal y transversal se puede observar que esta última es aproximadamente la mitad de la velocidad de la onda longitudinal [27].

2.6 CARACTERÍSTICAS DEL MEDIO.

Para hacer la deducción de la ecuación de onda, el análisis de las propiedades de la onda y de su propagación en un medio determinado, se supuso que este era perfectamente elástico; razón por la cual, no había perdida de energía acústica, es más, esta se limitaba a cambiar de energía potencial elástica a energía cinética de las partículas vibrantes del medio y

viceversa. Sin embargo, finalmente toda la energía acústica se disipa en forma de calor. Las causas de esta disipación se pueden dividir en dos categorías generales ^{[20] y [22]}:

1. **Pérdidas en las fronteras del medio.**
2. **Pérdidas en el medio.**

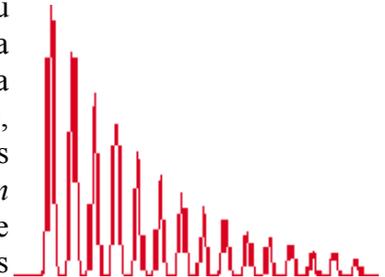
Las pérdidas en el medio se deben a tres factores fundamentales:

- ☆ **Pérdidas viscosas:** también conocidas como pérdidas por fricción interna, surgen siempre que hay movimientos relativos entre posiciones adyacentes del medio, tales como los que acompañan a las compresiones y a las rarefacciones en la propagación de una onda.
- ☆ **Pérdidas por conducción de calor:** resultan de la conducción de calor (energía térmica) entre las compresiones de mayor temperatura y las rarefacciones de menor temperatura.
- ☆ **Pérdidas asociadas con intercambios moleculares de energía.**

Debido a los factores de disipación de la energía acústica que sufre una onda al atravesar un medio determinado, surgen fenómenos como la atenuación acústica e impedancia acústica.

2.6.1 Atenuación acústica

Cuando una onda acústica viaja a través de un medio, su intensidad disminuye con la distancia. En materiales ideales, la intensidad (amplitud de la señal) solamente se reduce por la propagación de la onda. Sin embargo, en condiciones reales, todos los materiales producen un efecto que debilita aún más la intensidad del haz sonoro, efecto conocido como *atenuación acústica*. La atenuación acústica se define como la pérdida de energía que sufre una onda sonora cuando se desplaza a través de un material y se determina por la expresión ^{[18], [22] y [28]}:



$$I = I_0 e^{-2\alpha x} \quad (2.78)$$

Donde;

- I ≡ Intensidad acústica después de atravesar una distancia x .
- I_0 ≡ Intensidad inicial.
- α ≡ Coeficiente de atenuación.
- x ≡ Espesor del medio atravesado o distancia recorrida por el haz.

Anteriormente, el coeficiente de atenuación era expresado en nepers/m, donde el neper era una cantidad adimensional que denotaba la atenuación de la intensidad acústica por unidad de longitud y tenía un valor aproximado de 2.71828. En la actualidad es común expresar la atenuación de la intensidad acústica en términos del decibel (dB) ^{[22] y [28]}.

La atenuación acústica es la consecuencia normal de dos fenómenos físicos muy importantes, como son ^[20]:

☆ **Absorción acústica:** característica del medio que absorbe a través de la vibración de las moléculas parte de la energía cinética de las ondas y la disipa en forma de calor.

En un medio determinado la absorción se mide en términos de su coeficiente γ , el cual se define como: el cambio logarítmico de la intensidad por unidad de longitud. La intensidad I , se puede expresar como una función de la distancia x ^[22]:

$$I = I_0 e^{-\gamma x} \quad (2.79)$$

Donde;

$\gamma \equiv$ coeficiente de absorción.

Al considerar la presión acústica (ó el desplazamiento de la partícula o la velocidad de la misma), se utiliza la relación ^[22]:

$$p = p_0 e^{-\alpha x} \quad (2.80)$$

Donde;

p y $p_0 \equiv$ amplitud de la presión acústica (velocidad de la partícula o su desplazamiento) a las distancias x y $x=0$.

$\alpha \equiv$ coeficiente de atenuación.

Luego, el coeficiente de atenuación y el coeficiente de absorción se relacionan por ^[22]:

$$\alpha = \frac{1}{2} \gamma \quad (2.81)$$

El coeficiente de absorción es una cantidad que depende de la naturaleza del medio y de la frecuencia (figura 2.8), a bajas frecuencias hay una relación lineal entre estas cantidades. La absorción se debe principalmente a pérdidas por fricción interna ^[22].

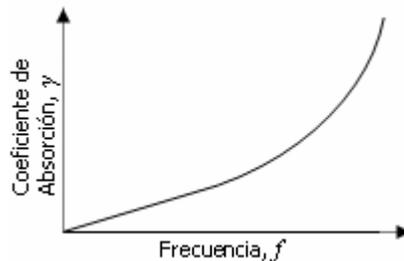


Fig. 2.8 Relación entre el coeficiente de absorción y la frecuencia para un medio sólido típico.

Además, el coeficiente de absorción de un material esta relacionado con la energía absorbida por el material y la energía reflejada por el mismo. De acuerdo con esta

formulación su valor siempre esta comprendido entre 0 y 1. El máximo coeficiente de absorción es 1 y se determina cuando toda la energía que incide en el material es absorbida por el mismo, y el mínimo es 0 cuando toda la energía es reflejada ^[29].

☆ **Dispersión acústica:** fenómeno físico que ocurre cuando la frecuencia de la onda acústica es tal que la longitud de onda de la misma es aproximadamente igual al tamaño del grano de la estructura molecular del material que esta siendo analizado, por lo que en cada frontera de grano hay reflexión parcial de las ondas en todas las direcciones debido a la forma irregular de los granos, lo que conlleva a la pérdida de la energía acústica de las ondas y a la reducción de su intensidad con respecto a la intensidad de la fuente ^[22].

De lo anterior se deduce que la atenuación acústica es un fenómeno físico directamente relacionado con la frecuencia de la onda. Esto es: “la atenuación es directamente proporcional al cuadrado de la frecuencia (*Atenuación* $\propto f^2$)” ^[28].

Existen textos y documentos que suministran tablas en las cuales se pueden encontrar una serie de propiedades y características, tanto de la onda como del medio a través del cual se propaga. Sin embargo, los valores de atenuación que se citan en las mencionadas tablas no son confiables, ya que la atenuación depende de la frecuencia, y en este caso particular los valores consignados vienen dados para una sola frecuencia o en el mejor de los casos se da un valor promedio de atenuación para un gran número de frecuencias. Además, la atenuación depende también de la forma como ha sido fabricado el objeto de prueba; por tanto, para obtener un valor confiable de la atenuación de un objeto particular es preciso determinarlo experimentalmente ^[28].

2.6.2 Impedancia acústica.

El sonido viaja a través de los materiales bajo la influencia de la presión acústica. Como las partículas de un material están limitadas entre si, el exceso de presión da lugar a una onda que se propaga a través del material ^[30].

La impedancia acústica es una característica fundamental del medio, que expresa la resistencia que ofrece un material, a ser atravesado por las ondas acústicas; y se define como el producto de la densidad por la velocidad de la onda acústica. Para ondas planas esta relación es ^{[2], [20] y [22]}.

$$z = \pm \rho c \quad (2.82)$$

Donde;

z \equiv Impedancia acústica.

\pm \equiv Signo que depende de la dirección de propagación (si es positiva o negativa).

ρ \equiv Densidad del medio.

c \equiv Velocidad de la onda.

La impedancia acústica es importante en ^[30]:

- ☆ La determinación del porcentaje de transmisión y reflexión de la intensidad acústica en el límite de dos materiales que tienen diferente impedancia acústica
- ☆ El diseño de transductores ultrasónicos.
- ☆ La determinación de la absorción del sonido en un medio.

El valor de la impedancia acústica es constante y característico de cada medio. Por tanto, cuando se refiere a un medio determinado recibe el nombre de impedancia acústica característica del medio ^[20].

La unidad de la impedancia acústica es el Rayleigh (Rayl) ^[31].

$$1 \text{ Rayleigh (Rayl)} = 1 \text{ Kg/m}^2 \cdot \text{s}$$

2.7 FENOMENOS DE LAS ONDAS ACÚSTICAS.

Los fenómenos más comunes que presentan las ondas acústicas se relacionan con el cambio de medio que se puede presentar en la trayectoria de una onda. Es decir; cuando una onda acústica viaja a través de un medio y se encuentra con un obstáculo o con la frontera de otro medio puede sufrir los fenómenos de: reflexión, transmisión, refracción y difracción ^[20].

2.7.1. Fenómenos de reflexión y transmisión.

Si una onda acústica incide normalmente en la frontera entre dos medios, ocurren los fenómenos de reflexión y transmisión. Luego, parte de la energía de la onda se refleja en la frontera y la energía restante se propaga dentro del otro medio (figura 2.9) ^[22].

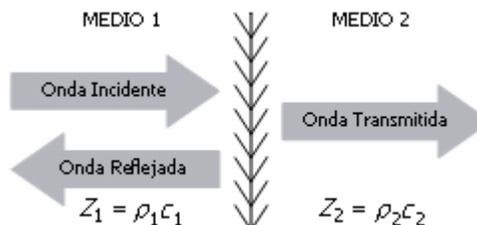


Fig. 2.9 Reflexión y transmisión de ondas planas que inciden normalmente en una frontera.

La reflexión de la onda acústica depende de los siguientes factores ^[32]:

- ☆ **Coefficiente de reflexión.** Depende de la impedancia acústica de ambos medios.
- ☆ **Ángulo de incidencia.** Angulo con el que incide la onda acústica con respecto a la normal.
- ☆ **Superficie de incidencia o interfaz entre los dos medios.** Se debe considerar la forma y el tipo de superficie.

Para una onda plana de incidencia normal a una frontera entre dos medios los coeficientes α_r y α_t (de reflexión y transmisión respectivamente) se definen por las ecuaciones ^[22]:

$$\alpha_r = \frac{I_r}{I_i} = \left(\frac{z_2 - z_1}{z_1 + z_2} \right) \quad (2.83)$$

y

$$\alpha_t = \frac{I_t}{I_i} = \frac{4z_1 z_2}{(z_1 + z_2)^2} \quad (2.84)$$

Este análisis se hizo considerando que los dos medios tienen espesores semi-infinitos (caso ideal). Sin embargo, para situaciones reales el análisis se complica, ya que uno o ambos medios suelen tener dimensiones finitas. En el ejemplo ilustrado en la figura 2.10, una capa de lados paralelos de un medio de espesor d e impedancia característica $\rho_0 c_0$, se coloca en un medio infinito que tiene una impedancia característica ρc . Una onda acústica que incide normalmente sobre esta capa, es parcialmente reflejada y parcialmente transmitida en la primera frontera de la capa. La onda transmitida incide perpendicularmente a la segunda frontera de la capa, donde nuevamente ocurre una reflexión parcial y una transmisión parcial. Las ondas reflejadas dentro de la capa, presentan el fenómeno de reflexión continua en las fronteras de la capa hasta que finalmente se extinguen, ya que sus intensidades disminuyen en cada reflexión. Si el movimiento de la onda es continuo y estable, ocurre un estado estable dentro de la capa y se forma un sistema de ondas estacionarias. Las características de estas ondas estacionarias depende de: la impedancia característica del medio, la longitud de onda y el espesor de la capa. A través de un ajuste adecuado de estas cantidades se puede obtener una transmisión total o una reflexión total de la energía ultrasónica ^[22].

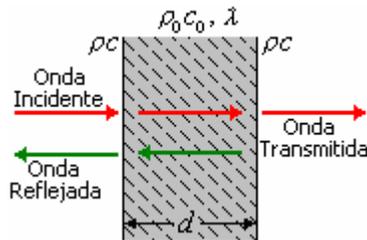


Fig. 2.10 Efecto de una capa de lados paralelos entre dos medios

Para condiciones estables, el coeficiente de reflexión de la capa se da por la expresión ^[22]:

$$\alpha_r = \frac{I_r}{I_i} = \frac{(r^2 - 1)^2}{4r^2 \cot^2(2\pi d / \lambda) + (r^2 + 1)^2} \quad (2.85)$$

y el coeficiente de transmisión por la relación ^[22]:

$$\alpha_t = \frac{I_t}{I_i} = \frac{4r^2}{4r^2 \cos^2(2\pi d / \lambda) + (r^2 + 1)^2 \sin^2(2\pi d / \lambda)} \quad (2.86)$$

Donde:

- I_i \equiv Intensidad de la onda incidente.
- I_r \equiv Intensidad de la onda reflejada.
- I_t \equiv Intensidad de la onda transmitida.
- r \equiv Relación entre la impedancia característica del medio circundante y la impedancia característica de la capa (esto es: $r = \rho c / \rho_0 c_0$).
- λ \equiv Longitud de onda en la capa.

Cuando la impedancia característica de la capa difiere en gran medida de la impedancia característica del medio circundante, la onda incidente es reflejada casi en su totalidad, aún en capas muy delgadas ^[22].

Complicaciones adicionales surgen cuando la onda incide en forma angular; en el caso de una capa sólida se transmiten diferentes tipos de ondas: longitudinales, transversales y de superficie, con diferentes ángulos y velocidades ^[22].

2.7.2. Fenómeno de refracción.

Cuando una onda acústica pasa a través de la interfase entre dos medios cuya impedancia acústica es diferente, una parte del haz atravesará la interfase sufriendo una refracción y la otra parte se reflejará formando un eco. De este modo, si el haz ultrasónico incide en la interfase con un ángulo α_1 con respecto a la normal, parte del haz se refleja con un ángulo α_2 (igual al ángulo de incidencia, ya que las dos ondas viajan en el mismo material y tienen las mismas velocidades) y parte se refracta con un ángulo β (fig 2.11). Cuanto menor es el ángulo α menor es el ángulo β ; de modo que, si el haz de ultrasonido incide perpendicularmente sobre la superficie del material, tanto el haz reflejado como el haz refractado siguen la misma trayectoria del haz incidente ^{[32] y [33]}.

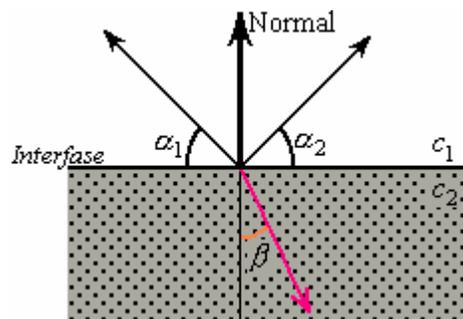


Fig. 2.11 Reflexión y refracción de la onda ultrasónica.

El fenómeno de refracción que ocurre en la interfase, se debe a la diferencia entre las velocidades de las ondas acústicas dentro de los dos materiales. La velocidad del sonido en

cada material se determina por las propiedades del mismo (módulos elásticos y densidad). En la figura 2.12, se observa una serie de ondas planas que viajan a través de un material e ingresan a un segundo material que tiene una velocidad acústica más alta; por tanto, cuando la onda encuentre la interfase entre estos dos materiales, la porción de la onda en el segundo material se moverá más rápidamente que la porción de la onda en el primer material, lo que provocará que la onda se flexione. Así, cuando el haz de ultrasonido atraviesa una interfase hacia un medio donde su velocidad de propagación (c_2) es mayor a la velocidad previa (c_1), el haz se desviará alejándose de la normal. En caso contrario, si $c_1 > c_2$, el haz se acercará a la normal ^{[32] y [33]}.

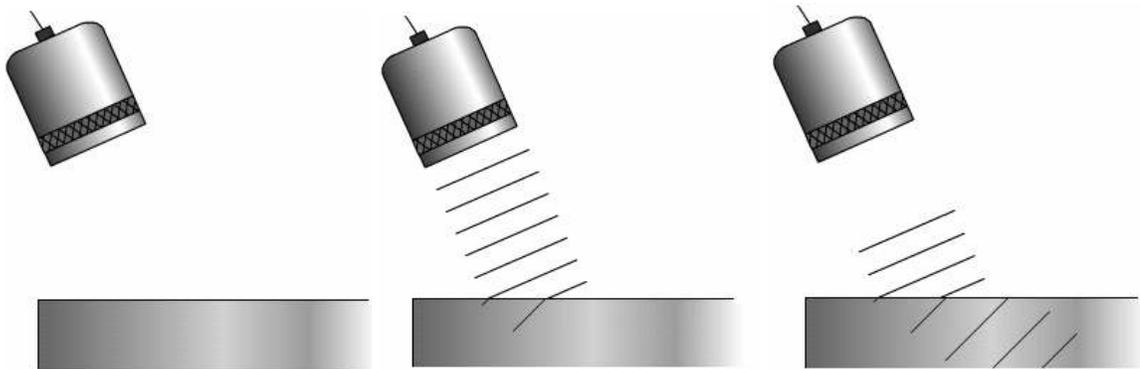


Fig. 2.12 Ondas planas viajando dentro de un material

La relación existente entre los ángulos y las velocidades de las ondas acústicas en los dos medios se analiza a través de la conocida Ley de Snell, la cual se encarga de comparar la razón de las velocidades de los materiales c_1 y c_2 con la razón del seno de los ángulos de incidencia (α) y de refracción (β), como se observa en la ecuación ^[33]:

$$\frac{\text{sen } \alpha}{\text{sen } \beta} = \frac{c_1}{c_2} \quad (2.87)$$

Donde:

- $\text{sen } \alpha$ ≡ Seno del ángulo de incidencia.
- $\text{sen } \beta$ ≡ Seno del ángulo de refracción.
- c_1 ≡ Velocidad del ultrasonido en el medio 1.
- c_2 ≡ Velocidad del ultrasonido en el medio 2.

2.7.3. Fenómeno de difracción.

En un medio homogéneo las ondas de ultrasonido viajan en línea recta. Sin embargo, si ellas entran en contacto con un obstáculo puede ocurrir un cambio en la dirección de su movimiento, es decir pueden curvar su trayectoria. Este fenómeno se denomina *difracción* y es característico de todo tipo de ondas de movimiento y se observa con claridad en valores proporcionales entre la longitud de onda y el tamaño del obstáculo ^[22].

Al considerar longitudes de onda muy pequeñas (del orden de los μm) comparadas con el tamaño del obstáculo, se pueden ignorar los efectos de la difracción y considerar que las ondas se propagan en línea recta. Sin embargo, si la longitud de onda es de tamaño similar o más grande que el tamaño del obstáculo, esta simplificación no se puede considerar y el fenómeno de difracción debe ser tomado en cuenta. La figura 2.12, muestra el fenómeno de difracción en los dos casos extremos ^[22].

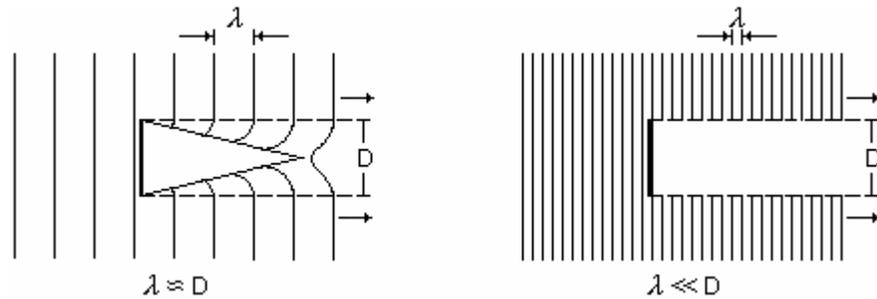


Fig. 2.13 Fenómeno de difracción.

2.8 SUPERPOSICIÓN O INTERFERENCIA DE ONDAS ULTRASONICAS.

No se puede finalizar el presente capítulo, sin abordar el tema de la superposición o interferencia de las ondas de ultrasonido, dada la importancia que tiene en el momento de realizar el análisis del funcionamiento del transductor ultrasónico.

En los análisis anteriores, la propagación de la onda se asumió como una sola onda senoidal que se propaga a través del material. Sin embargo, el sonido que emana de un transductor ultrasónico no es originado en un solo punto; por el contrario, se origina en muchos puntos a lo largo de la superficie del elemento piezoeléctrico. Esto da lugar a un campo de sonido con muchas ondas que interactúan o interfieren entre sí ^[34].

Cuando las ondas acústicas interactúan entre sí, se superponen unas con otras, y la amplitud de la presión acústica o el desplazamiento de la partícula en cualquier punto de interacción, es la suma de las amplitudes de las dos ondas individuales, si las amplitudes de las componentes son pequeñas (sistema lineal).

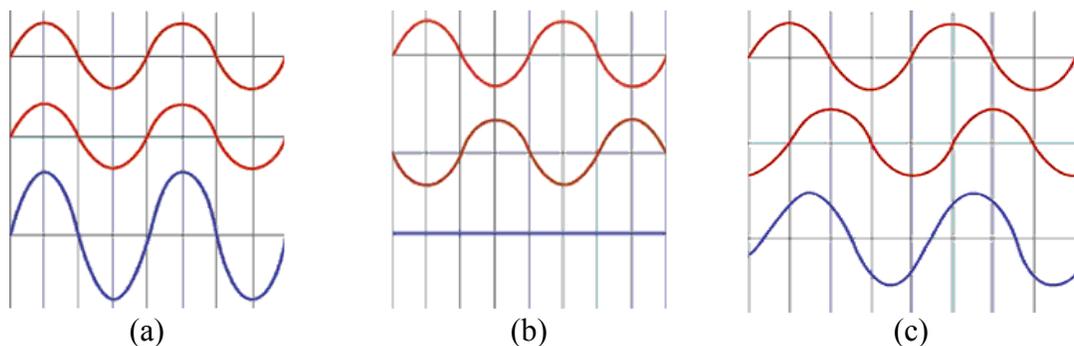
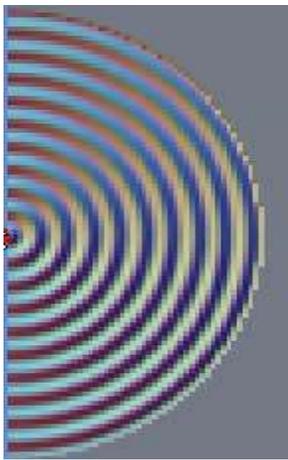


Fig. 2.14 Interferencia a) Interferencia constructiva b y c) Interferencia destructiva

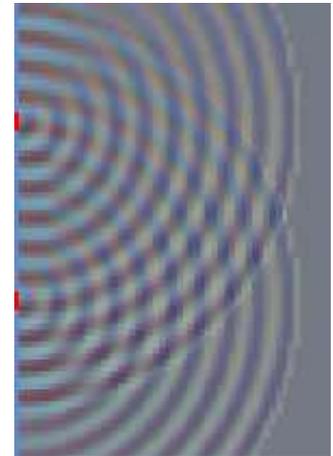
Si se consideran dos ondas idénticas que se originan en el mismo punto (figura 2.14), cuando están *en fase* se fusionan y duplican el desplazamiento de cualquier onda que actúe individualmente, a este fenómeno se le conoce como *interferencia constructiva*. Pero, si las ondas están totalmente *fuera de fase* se fusionan y se anulan una con otra, fenómeno conocido como *interferencia destructiva*. Así mismo, cuando las dos ondas no están totalmente *en fase* o totalmente *fuera de fase*, el desplazamiento de la onda resultante es la suma de las amplitudes de las ondas individuales para todos los puntos a lo largo de estas, esta es otra forma de interferencia destructiva ^[34].

Cuando el punto de origen de las dos ondas que interactúan no es el mismo, resulta más difícil representar la superposición de la onda, pero los principios físicos siguen siendo los mismos.



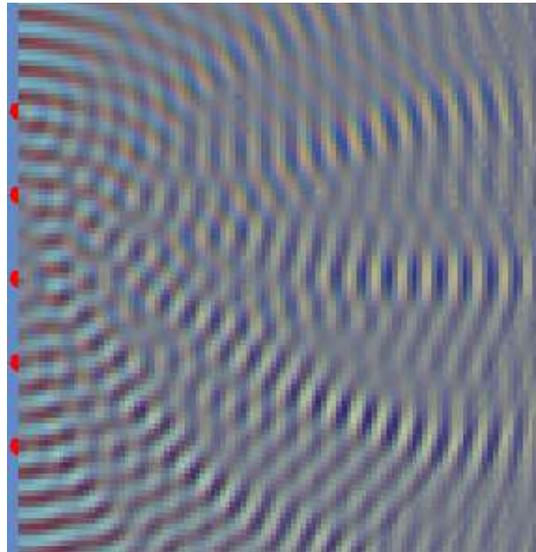
En un transductor ultrasónico se emiten ondas acústicas con un frente de onda circular. Si se lograra conseguir que ellas fueran emitidas por un solo punto en la superficie de contacto del transductor, el campo acústico tendría una forma similar a la que se muestra en la figura de la izquierda; donde las áreas luminosas son las áreas de rarefacción y las áreas oscuras son las áreas de compresión. Sin embargo, como se afirmó previamente, las ondas acústicas se originan en muchos puntos a lo largo de la superficie de contacto del transductor. La figura de la derecha

muestra lo que sería el campo acústico característico, si las ondas se originarán exactamente en dos puntos. En esta figura se puede observar que las ondas acústicas se superponen, y que hay áreas de interferencia constructiva y áreas de interferencia destructiva. Los puntos de interferencia constructiva se conocen como *antinodos* ^[34].



Realmente, hay más de dos puntos de origen de ondas acústicas a lo largo de la superficie de contacto de un transductor. La figura 2.15 muestra cinco puntos de emisión acústica, y se puede observar que cerca del transductor hay fluctuaciones extensas y el campo acústico es desigual; en evaluación ultrasónica esto se conoce como *campo cercano* o *zona de Fresnel*. El campo acústico es más uniforme lejos del transductor en el *campo lejano* o *zona de Fraunhofer*, donde el haz se dispersa con un patrón que se origina desde el centro del transductor. Es preciso resaltar que aún en el campo lejano, el frente de onda no es uniforme; sin embargo, a cierta distancia del transductor y en la zona central al mismo, se desarrolla un campo de onda uniforme e intenso.

Múltiples puntos de origen acústico a lo largo del transductor



Campo acústico fuerte y uniforme.

Fig. 2.15 Emisión acústica de 5 reflectores en la superficie de un transductor ultrasónico.

La curvatura y el área sobre la que se está generando el ultrasonido, la velocidad a la cual viajan las ondas dentro del material y la frecuencia acústica, afectan el campo acústico ^[34].

3. FUNDAMENTOS DE LAS MEDIDAS ULTRASONICAS

El diseño del Analizador Ultrasónico estará orientado a la implementación de la técnica de Evaluación no Destructiva por ultrasonido con la cual se busca detectar defectos o fallas en componentes estructurales, defectos que han podido ser originados en la etapa de fabricación o en la etapa de servicio. Por tal razón, se escogió los materiales metálicos listados en el Anexo A, como aquellos materiales a los cuales se les aplicará esta técnica.

Por lo anterior, se hace necesario hacer una breve descripción de las propiedades mecánicas y tecnológicas de los materiales metálicos y de las posibles fallas que se pueden presentar en la etapa de fabricación y en el tiempo de vida útil.

3.1 PROPIEDADES MECANICAS DE LOS MATERIALES METALICOS.

Para elegir los materiales con los cuales se construyen las estructuras metálicas, se tienen en cuenta las propiedades mecánicas de los mismos, ya que ellas permiten deducir el comportamiento de un metal cuando haya sido expuesto a distintas cargas y esfuerzos que tiendan a alterar su forma. Estas propiedades son ^[35]y ^[36]:

- ☆ **Dureza:** Propiedad que expresa el grado de deformación permanente que sufre un metal bajo la acción directa de una carga determinada; esta propiedad se observa cuando el metal se resiste a ser rayado o cortado por otro material.
- ☆ **Flexibilidad:** Es la capacidad que tiene un material para ser doblado sin que presente ruptura.
- ☆ **Elasticidad:** Propiedad que le permite a un material recuperar su forma, después de haber sido: estirado, comprimido o retorcido. Los metales poseen un punto crítico denominado límite elástico, a partir del cual si se excede la carga a la cual es sometido el metal, éste podría sufrir una deformación permanente.
- ☆ **Resistencia:** Propiedad que tiene un metal para soportar una carga externa. Si el metal debe soportar dicha carga sin presentar ruptura, a esta carga se le denomina carga de ruptura y puede ser generada por métodos de: tracción, compresión, torsión o cizallamiento.
- ☆ **Plasticidad:** Capacidad de deformación permanente de un metal sin llegar al punto de ruptura.
- ☆ **Tenacidad:** Resistencia a la ruptura por esfuerzos de impacto que deformen el metal. Para que un metal posea tenacidad, se requiere que tenga a la vez resistencia y plasticidad.
- ☆ **Fragilidad:** Propiedad que expresa la falta de plasticidad, y por tanto, de tenacidad. Los materiales frágiles se rompen en el límite elástico es decir, su ruptura se produce espontáneamente al rebasar la carga correspondiente al límite elástico.

- ☆ **Resiliencia:** Resistencia de un metal a su ruptura por choque.
- ☆ **Fluencia:** Propiedad de algunos metales para deformarse lenta y espontáneamente bajo la acción de su propio peso o de cargas muy pequeñas.
- ☆ **Fatiga:** Si se somete una pieza a la acción de cargas periódicas (alternativas o intermitentes), se puede llegar a producir ruptura con cargas menores a las que se producirían deformaciones.

3.2 PROPIEDADES TECNOLÓGICAS DE LOS MATERIALES METALICOS.

Son aquellas propiedades que determinan la capacidad de un metal para ser procesado y convertido en pieza o parte útil. A continuación se describen las más importantes ^[36]:

- ☆ **Ductilidad:** Capacidad que posee el metal para dejarse deformar o trabajar en frío; esta propiedad aumenta con la tenacidad y disminuye al aumentar la dureza. Los metales más dúctiles son: el oro, la plata, el cobre, el hierro, el plomo y el aluminio.
- ☆ **Fusibilidad:** Propiedad que permite obtener piezas fundidas o coladas.
- ☆ **Colabilidad:** Es la capacidad que posee un metal cuando al ser sometido al proceso de fundición permite obtener piezas fundidas completas y sin defectos. Para que un metal sea colable debe tener una gran fluidez para poder llenar completamente el molde. Los metales más fusibles y colables son: hierro, bronce, latón y aleaciones ligeras.
- ☆ **Soldabilidad:** Es la disposición de un metal para soldarse con otro idéntico bajo la presión ejercida sobre ambos en un entorno caliente. Poseen esta propiedad los aceros de bajo contenido de carbono.
- ☆ **Endurecimiento por el temple:** Es la propiedad del metal que le permite sufrir transformaciones en su estructura cristalina como resultado del calentamiento y enfriamiento sucesivo y de sus propiedades mecánicas y tecnológicas. Los aceros se templean fácilmente debido a la formación de una estructura cristalina característica denominada martensita.
- ☆ **Facilidad de mecanizado:** Propiedad del metal que le permite dejarse mecanizar con arranque de viruta, a través del uso de una herramienta cortante apropiada. Son muy mecanizables la fundición gris y el bronce, con virutas cortadas en forma de escamas. El acero dulce y las aleaciones ligeras de alta tenacidad, producen virutas alargadas.

3.3 FALLAS O DEFECTOS EN MATERIALES METALICOS

A pesar de que las fallas de un elemento estructural o de una estructura completa son poco comunes, cuando llegan a suceder son atribuibles a dos causas principales: los defectos pre-existentes de manufactura, o el daño inducido durante el servicio ^[37].

Los defectos pre-existentes de manufactura resultan principalmente de la negligencia, la ignorancia o los errores humanos en alguno de los procesos de diseño, selección de materiales, manufactura o control de calidad. En cambio, el daño inducido durante el servicio, que es más difícil prevenir por presentarse en nuevos diseños y/o nuevos

materiales, se debe a comportamientos desconocidos o condiciones que no se pudieron anticipar o prever durante el diseño. En ambos casos, las fallas son posibles de superar mediante la utilización del criterio de diseño con tolerancia al daño y la aplicación adecuada de la evaluación no destructiva ^[37].

Existe un gran número de casos documentados sobre fallas en materiales y componentes estructurales, cuyo origen se debe fundamentalmente a daños inducidos en servicio. Si bien es cierto que las causas que las originan son múltiples y que también intervienen diversos factores; es posible clasificar las fallas según las causas de origen más comunes ^[37]:

- ☆ **Fallas por deformación plástica:** Dado que todas las estructuras se construyen con materiales deformables, es importante considerar en el análisis estructural los cambios en las dimensiones que producen las cargas aplicadas. Pues, los materiales se comportan en forma elástica cuando las fuerzas que actúan sobre ellos son pequeñas. El parámetro que rige el comportamiento de las deformaciones elásticas es la rigidez del material, y en el diseño se supone que las deformaciones se recuperan cuando el material es descargado, retornando así a su forma original. Las deformaciones elásticas no son causa de falla por sí mismas, pero pueden inducir fallas por interferencias o contacto entre componentes al momento de deformarse, provocando que el sistema se comporte de manera irregular. Estas fallas se producen por errores de diseño.
- ☆ **Fallas por deformación inelástica:** Cuando las fuerzas que se aplican a un componente estructural son excesivas, se puede sobrepasar el límite elástico del material, e inducir deformaciones permanentes en el mismo. Aunque las estructuras se diseñan para no sobrepasar estos límites de cedencia, es posible que esto ocurra en las zonas de mayor concentración de esfuerzos. No todas las deformaciones permanentes conducen a una fractura inmediata, pero es común que se conviertan en zonas débiles de la estructura en las que la concentración de esfuerzos se puede incrementar hasta generar grietas que posteriormente generan fracturas.
- ☆ **Fallas por pandeo:** Esta es una falla típica de vigas o placas sometidas a cargas de compresión. En este caso, se produce una inestabilidad estructural cuando las cargas de compresión generan deflexiones laterales, y subsecuentes momentos de flexión que desembocan en más deformaciones. El pandeo puede ocurrir con cargas muy pequeñas, menores a las de cedencia y es un fenómeno no lineal controlado por la rigidez del material y su geometría. El pandeo es una falla que cuando se presenta suele ser catastrófica.
- ☆ **Fallas por fatiga:** Cuando una estructura se somete a cargas cíclicas se produce un deterioro en el interior del material, lo que induce a que aún con cargas pequeñas se generen grietas y fallas graves. El deterioro se inicia con defectos o micro-grietas que actúan como zonas de concentración de esfuerzos para la aparición y propagación de grietas.
- ☆ **Fallas por fluencia:** La fluencia es un fenómeno asociado con el tiempo, y ocurre cuando un elemento estructural se somete a cargas estáticas en periodos prolongados. Por lo general, cuando una carga se libera, las deformaciones elásticas del material se recuperan, pero las inelásticas permanecen. En el caso de la fluencia, aun cuando las cargas no sobrepasan los límites elásticos presentan deformaciones permanentes debido

a que ocurren procesos de difusión y dislocación, los cuales dependen del tiempo y la temperatura. Por esto, la fluencia es particularmente importante en metales cuando trabajan por tiempos prolongados a altas temperaturas, mientras que en polímeros ocurre a temperatura ambiente.

- ☆ **Fallas por corrosión:** La corrosión es una degradación del material por ataque químico que se presenta en diversas formas: galvánica (por el contacto de dos metales diferentes), picaduras, exfoliación, ataque intergranular, o en combinación con la concentración de esfuerzos. Es un proceso altamente ligado con el tiempo que depende de las características del material y del medio ambiente. En general, el proceso de corrosión es más agresivo cuando el material se somete a altas temperaturas y humedad. La corrosión se manifiesta en la mayoría de los casos como una pérdida de espesor; sin embargo, en combinación con esfuerzos de tensión, se forman y desarrollan grietas que en muchos casos, suelen ser graves.
- ☆ **Fallas por fractura:** Una falla catastrófica en una estructura ocurre cuando se presenta la ruptura de una o varias de sus partes. En la mayoría de los casos, las fallas por fractura se deben a sobrecargas, aunque existen fallas que son originadas por defectos o grietas pre-existentes con niveles relativamente bajos de carga. La fractura de un material, se inicia cuando éste presenta un comportamiento dúctil en el que se libera una gran cantidad de energía en forma de deformación permanente, por lo tanto, es posible anticipar la falla mediante la detección de deformaciones.

3.4 LAS MEDIDAS ULTRASONICAS.

3.4.1 Introducción.

La propagación de ondas ultrasónicas dentro de un material de prueba se relaciona con las propiedades elásticas del material y la homogeneidad de su estructura. Cualquier análisis de esta relación debe involucrar observaciones de la intensidad y de la dirección de las ondas; además de la medida del tiempo empleado por ellas para atravesar el material ^[22].

Existen dos métodos muy comunes de análisis ^[22]:

- ☆ **Detección ultrasónica de defectos:** que consiste en la búsqueda de discontinuidades (defectos) en la estructura interna de un material.
- ☆ **Inspección de las propiedades de un medio continuo:** que comprende la medida de parámetros tales como velocidad y absorción ultrasónica.

A pesar de que son dos métodos diferentes, no existe límite definido entre ellos. En un método típico de análisis para detectar defectos, se buscan discontinuidades que reflejen las ondas o les proporcionen una sombra; sin embargo, algunos defectos como la existencia de una gran estructura de grano dentro del material o la distribución más o menos uniforme de inclusiones de materia extraña, no pueden ser detectados por el primer método. Por lo tanto, aunque ocurren discontinuidades en la estructura interna del material, ellas no proporcionan

reflexión regular si su tamaño es pequeño comparado con la longitud de onda; no obstante, estos diminutos defectos estructurales se pueden investigar a través de la absorción, pues ella aumenta cuando se disminuye la longitud de onda a causa de un incremento en la frecuencia ^[22].

3.4.2 Métodos de detección de defectos.

Los principales métodos de evaluación no destructiva por ultrasonido que se emplean en la detección de defectos, se hallan clasificados en tres categorías y son: *transmisión*, *resonancia* y *pulso-eco* ^[22].

A continuación se hace una breve descripción de cada uno de estos métodos, enfatizando de manera especial en el método del pulso-eco; pues esta es la técnica que se utilizará en el diseño y construcción del analizador ultrasónico.

3.4.2.1 Método de transmisión.

Este método se fundamenta en la penetración de ondas de ultrasonido en el material de prueba a través de una de sus superficies; estas ondas son emitidas por el transmisor y recogidas por el receptor en la superficie opuesta del material. Así cualquier discontinuidad (hueco, poro o grieta) en la trayectoria del haz dentro del material dará lugar al fenómeno de reflexión, originando una disminución en la intensidad del haz transmitido ^[22].

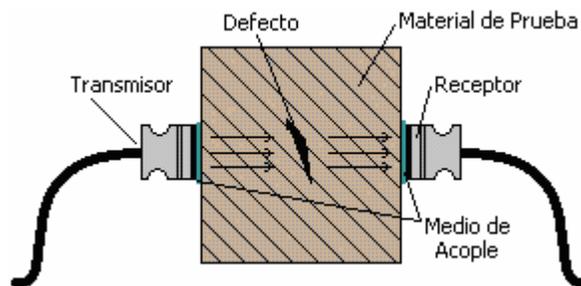


Fig. 3.1 Método de transmisión

Para la implementación de este método no es aconsejable el uso de ondas continuas, dado que ellas suelen formar ondas estacionarias en el material de prueba y en los materiales intermedios, debido a las continuas reflexiones en los defectos y paredes de los materiales. Si bien, esto se puede evitar variando periódicamente la frecuencia mediante la técnica de *modulación de frecuencia*, el método de transmisión bajo estas condiciones no es muy utilizado, pues resulta más simple trabajar con ondas pulsadas para las cuales en cualquier caso se puede recurrir directamente al método del pulso-eco. Es importante tener en cuenta que el uso de ondas pulsadas también presenta dificultades cuando se examinan capas delgadas de material, ya que se puede producir el fenómeno de resonancia si el ancho del pulso es demasiado grande. Este fenómeno se puede corregir trabajando con frecuencias

más altas para disminuir el ancho del pulso, observando que el incremento que se produce en la absorción no sea demasiado grande ^[22].

Para evitar el fenómeno de resonancia en capas delgadas de material que poseen bajos coeficientes de absorción, se debe garantizar que el espesor (g) de la capa del material de prueba o líquido de acople sea mayor que el espesor mínimo (g_{\min}) expresado en la ecuación ^[22]:

$$g_{\min} = \frac{\tau c}{2} \quad (3.1)$$

donde;

g_{\min} \equiv Espesor mínimo de la capa del material o líquido de acople.

τ \equiv Tiempo de duración del pulso.

c \equiv Velocidad de propagación de las ondas ultrasónicas en el material de prueba en el cual se pueden formar ondas estacionarias.

Por ejemplo, se tiene un pulso que viaja a través de una delgada hoja de acero, cuyo tiempo de duración es de $5 \mu\text{seg}$; si se quiere evitar que ocurra el fenómeno de resonancia, el espesor de la hoja de acero debe ser superior a:

$$g_{\min} = \frac{5 \mu\text{seg} \times 5940 \text{ m/seg}}{2} \approx 15 \text{ mm} (0.6 \text{ pul.})$$

Si se cambia la hoja de acero por una capa de agua como fluido de acople, en cuyo interior las ondas de ultrasonido se propagan a una velocidad de 1400 m/s , se tiene:

$$g_{\min} = \frac{5 \mu\text{seg} \times 1400 \text{ m/s}}{2} = 3.7 \text{ mm} (0.15 \text{ pul.})$$

3.4.2.1.1 Detección de defectos por el método de transmisión.

Para detectar la presencia de un defecto mediante el método de transmisión, el defecto debe ser lo suficientemente grande, a fin de que la intensidad de la señal recibida se reduzca en una cantidad apreciable; pues de lo contrario, la intensidad de las ondas reflejadas por el defecto no se puede distinguir de la intensidad de las ondas transmitidas a través del material de prueba ^[22].

En este método el haz de ultrasonido debe tener una sección transversal uniforme en toda la trayectoria dentro del material de prueba, de este modo se garantiza que los defectos ubicados dentro del haz, con dimensiones iguales, pero situados a diferentes distancias del receptor ejerzan el mismo efecto sobre las ondas. Sin embargo, esto ocurre solamente cuando el campo cercano del transductor se extiende sobre todo el espesor del material radiado. En un transductor circular la longitud del campo cercano se obtiene de ^{[17] y [22]}:

$$L_{Cercano} = \frac{d^2}{4\lambda} \quad (3.2)$$

donde;

- $L_{Cercano}$ \equiv Longitud del campo cercano
- d \equiv Diámetro de la superficie del transductor
- λ \equiv Longitud de onda en el material examinado

Para un diámetro dado esta distancia se incrementa con una disminución en la longitud de onda; sin embargo, es importante tener en cuenta que a longitudes de onda más cortas hay menos difracción en el defecto y la sombra resultante se agudiza, mientras que a longitudes de onda más grandes hay un incremento en la difracción y el haz converge rápidamente a destruir la sombra. Por tanto, para detectar defectos pequeños se debe seleccionar una longitud de onda adecuadamente corta, cuyo límite inferior se determine por un moderado incremento en la absorción, de modo que en la mayoría de los casos se trabaja con la frecuencia más alta consistente con una moderada absorción ^[22].

Los defectos más pequeños que se pueden observar por medio de este método son proporcionales a los que se pueden detectar por el método de pulso-eco; sin embargo, la detección en este caso solo es posible para capas delgadas de material (pocos mm aprox.); esto se debe a la rápida convergencia de las ondas difractadas detrás de los defectos ^[22].

3.4.2.1.2 Ventajas y desventajas del método de transmisión ^[22]:

El método de transmisión al igual que cualquier otro método de detección de defectos suele tener una serie de ventajas y desventajas, las cuales están relacionadas con las características fundamentales del método o con la forma como ha sido implementado. Entre las principales ventajas y desventajas de este método se tienen:

☆ **Ventajas:**

- ✘ Simplifica el análisis de materiales que tienen una gran estructura de grano y superficies desiguales; por ejemplo, ciertos tipos de piezas fundidas.
- ✘ No existe límite inferior en el espesor del material de prueba, lo que lo hace muy adecuado para el análisis de hojas delgadas (laminas).
- ✘ Dado que no se mide la posición del defecto, el aparato utilizado por el método de transmisión puede tener una construcción muy simple, además de que se le puede adaptar un registro gráfico automático utilizando un sistema de pluma para indicar el nivel de la señal recibida.

☆ **Desventajas:**

- ✘ Las dos sondas que se utilizan en la implementación del método deben estar ubicadas en posiciones exactamente opuestas entre si; a menos de que se haya hecho

una adecuada guía mecánica, el método de transmisión resulta difícil de realizar; aunque ofrece cierta utilidad en la experimentación automática.

- ✘ El material de prueba debe ofrecer accesibilidad a dos de sus superficies opuestas.

3.4.2.2 Método de resonancia.

Este método depende del fenómeno de reflexión de las ondas de ultrasonido desde las superficies de las discontinuidades o defectos. Dado que, las señales de las ondas transmitidas y reflejadas se superponen, las tensiones aplicadas a determinados puntos en el material de prueba por las ondas de ultrasonido que viajan en dos direcciones opuestas, se adicionan. Cuando la diferencia de fase entre la onda incidente y la onda reflejada es tal que sus máximos coinciden, ocurre el fenómeno de resonancia y la amplitud de la tensión resultante en el material es un máximo. Pueden ocurrir múltiples reflexiones de las ondas entre las superficies paralelas del material, generando así un incremento muy grande en la amplitud de las ondas resultantes; esta amplitud estará por encima de la amplitud de las ondas transmitidas inicialmente (figura 3.2) [22].

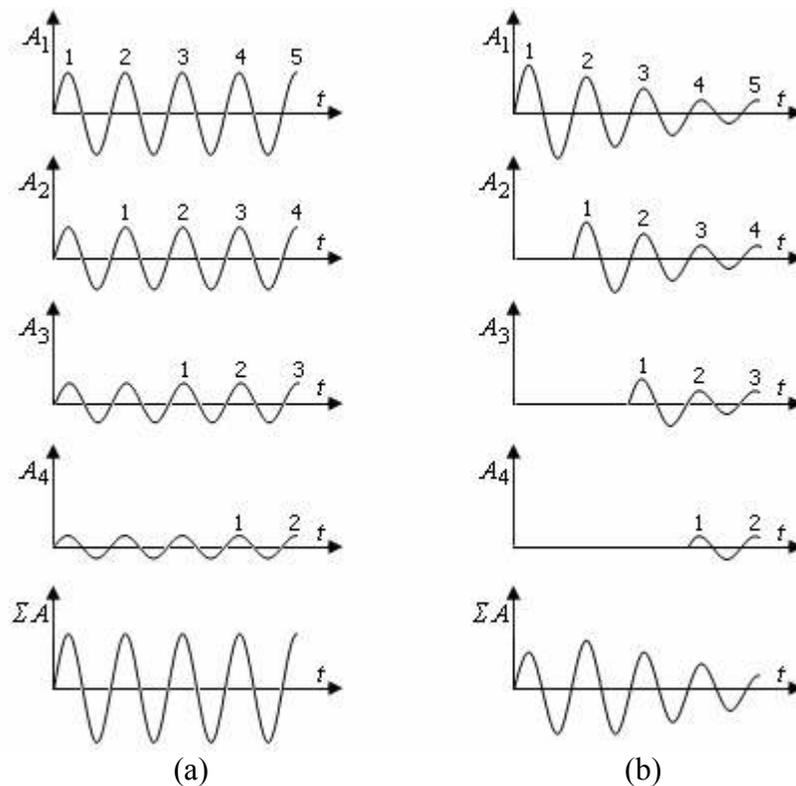


Fig. 3.2 Interpretación gráfica de la resonancia como una adición de múltiples reflexiones de onda ultrasónicas en una capa de material: (a) resonancia de ondas continuas, (b) resonancia de pulso.

El método de resonancia se puede utilizar para medir espesores de materiales con lados paralelos y, para medir la distancia de una lámina desde una de las superficies de la muestra, requiriendo solamente de esta superficie para el acceso. Sin embargo, se debe

conocer la velocidad de propagación de la onda en el material y estar en capacidad de medir la frecuencia resonante ^[22].

Los dos tipos básicos del método de resonancia utilizados en el análisis de materiales son el método de resonancia de ondas continuas y el método de resonancia de pulso (figura 3.2) ^[22].

En el método de resonancia de ondas continuas, las ondas de ultrasonido se transmiten todo el tiempo, lo que garantiza que las ondas reflejadas siempre interfieran con las ondas transmitidas. Sin embargo, es difícil detectar la resonancia cuando el transductor está radiando pues el voltaje que se le aplica es mucho mayor que cualquiera de los voltajes inducidos por las ondas reflejadas, aunque se puede utilizar un transductor receptor para detectar la resonancia, esto sólo es posible cuando hay acceso disponible en el lado opuesto del material de prueba; además de que se perdería el propósito del método pues se podrían utilizar métodos ordinarios para medir el espesor de la muestra ^[22].

Para detectar la resonancia en el método de ondas continuas, debe existir un área de contacto suficientemente grande entre el transductor y la superficie del material de prueba. En la práctica, los transductores de cuarzo utilizados por este método tienen un diámetro de aproximadamente 1.2 pulg. (30 mm) y se deben presionar firmemente a la superficie del material ^[22].

El método de resonancia de ondas continuas es adecuado para el análisis de hojas de metal, como los cascos de buques, cubiertas de calderas, etc., cuyos espesores oscilan entre 0,1 pulg. y 8 pulg. (2 mm y 200 mm aprox.), con un error del 2 al 5 por ciento ^[22].

Muchas ventajas se pueden obtener al utilizar el método de resonancia de pulso, el cual combina las mejores características del método de resonancia y del método del pulso-eco. Observando en el osciloscopio los pulsos reflejados superpuestos y el tiempo de retardo tomado por las ondas para viajar y regresar a través del material, y ajustando la frecuencia para que la diferencia de fase entre las ondas reflejadas sucesivamente sea $2\pi k$ (algún múltiplo de una oscilación completa, siendo k un número entero positivo), se puede obtener la amplitud máxima de las ondas superpuestas. En el lugar en el cual el tiempo entre las reflexiones sucesivas es más largo que el tiempo de duración de los pulsos, no puede ocurrir el fenómeno de superposición y por tanto no se puede observar el fenómeno de resonancia, situación que limita el método para la medida de espesores con detectores de defectos ordinarios en los cuales los pulsos son normalmente cortos. Por otro lado, se puede utilizar un detector de defectos para medir espesores más grandes en términos de las distancias entre los pulsos reflejados sucesivamente, aunque esto resulta difícil cuando los pulsos se traslapan ^[22].

Con el método de resonancia de pulso se puede medir espesores de láminas y tubos en el rango de 0.02 a 2 pulg. (0.5 a 50 mm) con un error del 2 al 5 por ciento. La principal ventaja del método de resonancia de pulso es que permite medir superficies curvas y rugosas ^[22].

3.4.2.3 Método de pulso-eco.

Si se considera la propagación de ondas de ultrasonido emitidas por un transductor colocado en la superficie de un medio continuo, cuando las ondas llegan a un defecto tal como una fractura, hueco, inclusión no metálica, etc., ellas se reflejan. Este fenómeno se debe a que el defecto tiene una impedancia característica que difiere considerablemente de la impedancia característica de la parte restante del material de prueba. Por tanto, se puede determinar la posición del defecto conociendo la velocidad del sonido dentro del material y midiendo el tiempo transcurrido desde el instante en que las ondas entran al medio hasta el instante en que lo dejan después de haber sido reflejadas por el defecto. Es importante resaltar que si las ondas son ondas continuas, no es posible medir el tiempo de viaje directamente, ya que es imposible distinguir un punto de otro de tal forma que se pueda rastrear el camino a través del material. Sin embargo, esta dificultad se puede superar utilizando ondas pulsadas, en las cuales se puede observar el frente del pulso y el tiempo de viaje se puede medir fácilmente ^[22].

La reflexión de los pulsos de ultrasonido desde la superficie de un defecto no es más que un ejemplo del eco que se puede generar con un sonido audible. Si una persona se coloca de pie en un sitio un poco distante de una pared plana y produce un sonido agudo (pulso de ondas acústicas), se escuchará un eco como consecuencia. Por tanto, la distancia desde la pared al sitio donde se halla parada la persona se puede calcular fácilmente, al medir el tiempo transcurrido desde el instante en que el pulso de sonido es producido hasta el instante en que el eco es escuchado, siempre que se conozca la velocidad del sonido en el aire. Esta es la razón por la cual a este método se le conoce comúnmente como el *método del eco* o *método del pulso-eco* ^[22].

En este método el tiempo de viaje del pulso ultrasónico es muy corto y se ubica por lo general en la región de un fragmento de milisegundo (1 mseg = 0,001 seg.); un tiempo tan pequeño como éste sólo se puede medir a través de medios electrónicos como el osciloscopio ^[22].

3.4.2.3.1 Detección de defectos por el método del pulso-eco.

El diagrama general del detector de defectos por ultrasonido que se observa en la figura 3.3, consta de un transmisor que genera un pulso eléctrico senoidal, este pulso excita al transductor adaptado a la *sonda transmisora* de vibraciones ultrasónicas, haciendo que esta sonda a su vez genere una serie de pulsos que se propagan como pulsos de ondas ultrasónicas dentro del material de prueba. En el instante en el cual el pulso ultrasónico abandona el transductor se activa el generador de la base de tiempos creando una mancha de luz que se mueve horizontalmente de derecha a izquierda con velocidad constante a través de la pantalla del osciloscopio, provocando la aparición de una línea horizontal (base de tiempos) ^[22].

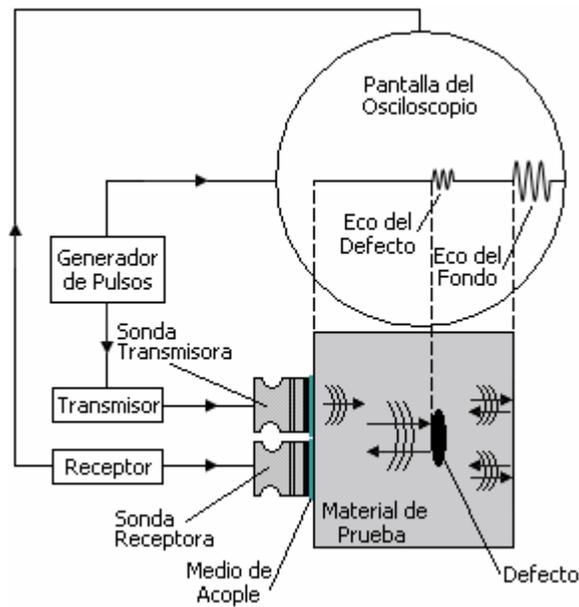


Fig. 3.3 Diagrama general del detector de defectos ultrasónico utilizado por el método del pulso-eco.

La presencia de un defecto provocará que algunas de las ondas sean reflejadas y regresen al transductor adaptado a la *sonda receptora*; en ese momento, las ondas se transforman en pulsos eléctricos que son entregados al receptor. Después de amplificados los pulsos se dirigen a las otras placas del osciloscopio, haciendo que la mancha lumínica tenga un movimiento vertical, independiente de su movimiento horizontal, por lo que aparece en pantalla del osciloscopio una imagen del defecto llamada *eco del defecto* ^[22].

Aquellas ondas que no incidieron en el defecto, se reflejan posteriormente en la superficie opuesta del material y regresan al transductor receptor. La imagen que le corresponde en la pantalla del osciloscopio se denomina *eco de fondo* y dado que las ondas que la originan han retornado un tiempo después de las ondas reflejadas por el defecto, el eco de fondo se desplaza hacia la derecha del eco del defecto. La base de tiempos se puede calibrar en unidades de tiempo o en unidades de distancia si se conoce la velocidad de propagación de la onda ultrasónica dentro del material ^[22].

Si se mide el tiempo (t) tomado por las ondas de ultrasonido para viajar a través del material y se conoce su velocidad de propagación, la distancia (l) del transductor al defecto se puede determinar a través de la relación:

$$l = \frac{tc}{2} \quad (3.3)$$

donde;

$c \equiv$ velocidad de propagación de las ondas de ultrasonido en el material.

3.4.2.3.2 Eficiencia de los detectores de defectos.

Cuando se quiere considerar la calidad del detector de defectos, se deben tener en cuenta ciertos factores como: frecuencia, ancho de pulso, transductores, fluido de acople, tamaño del defecto, características del circuito eléctrico, etc. Estos factores determinan las condiciones óptimas para medir y producir una interpretación precisa de los resultados ^[22].

Frecuencia (f): este factor exhibe su importancia en la detección de defectos cuando al incrementar la frecuencia se obtiene una gran concentración del haz ultrasónico, y por consiguiente una elevada intensidad de la onda incidente en el defecto; además, si se utiliza un transductor de cuarzo, cualquier incremento en la frecuencia se traduce en un mejor acople al circuito eléctrico debido a la alta impedancia eléctrica de entrada del transductor, generando con ello un aumento en la intensidad de las ondas, así como un aumento en el voltaje que aparece en los electrodos del transductor receptor; de este modo, un incremento en la frecuencia da lugar a un aumento en la sensibilidad del transductor ^[22].

Otro efecto que se observa al incrementar la frecuencia aplicada, es el aumento en la posibilidad de detectar defectos como respuesta a la disminución de la longitud de onda en el medio; pues como se sabe, a frecuencias pequeñas la longitud de onda es grande comparada con las dimensiones de algunos defectos, por lo que el haz es dispersado y no reflejado; sin embargo, no se debe olvidar el aumento que se da en la absorción como efecto del incremento en la frecuencia, en especial cuando la longitud de onda se aproxima al tamaño del grano. Por tanto, resulta ventajoso utilizar una frecuencia alta, siempre que ésta sea consistente con una moderada absorción ^[22].

Ancho de pulso (τ): la señal eléctrica generada por el transmisor puede tener una de las dos formas que se muestran en la figure 3.4; de la cual se puede observar lo difícil que puede ser la medida del ancho del pulso exponencialmente amortiguado, por lo que es común estimarlo como la extensión al punto donde la envolvente del pulso decae a una fracción de 0.1 de la amplitud máxima ^[22].

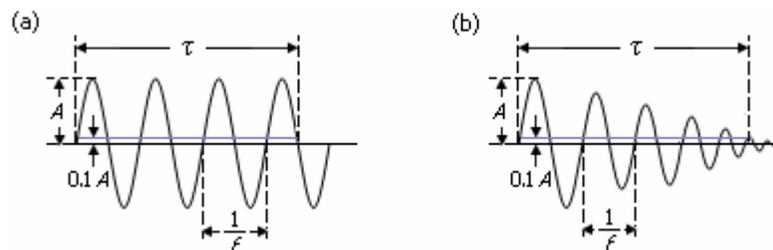


Fig. 3.4 Imágenes del pulso eléctrico formado por el transductor: (a) Pulso rectangular, (b) Pulso exponencial (amortiguado)

Al aplicar la señal eléctrica a los electrodos, el transductor vibra con una amplitud que se incrementa gradualmente hasta alcanzar un valor estable. En el momento en que la señal es suspendida, las oscilaciones del transductor no cesan inmediatamente, sino que su amplitud va disminuyendo a cero de manera exponencial ^[22].

Cuando la frecuencia de la señal eléctrica aplicada es igual a la frecuencia resonante del transductor, éste vibra con máxima amplitud; pero si esta frecuencia es variable, el transductor no sólo oscilará a la frecuencia eléctrica aplicada sino también a la frecuencia resonante, así la amplitud este decreciendo; en el momento en que la amplitud alcanza un valor estable, las únicas oscilaciones del transductor serán aquellas que tengan una frecuencia igual a las oscilaciones eléctricas aplicadas. En la fig. 3.5 se observan los diferentes fenómenos que ocurren cuando se hace variar la frecuencia aplicada con respecto a la frecuencia resonante del transductor ^[22].

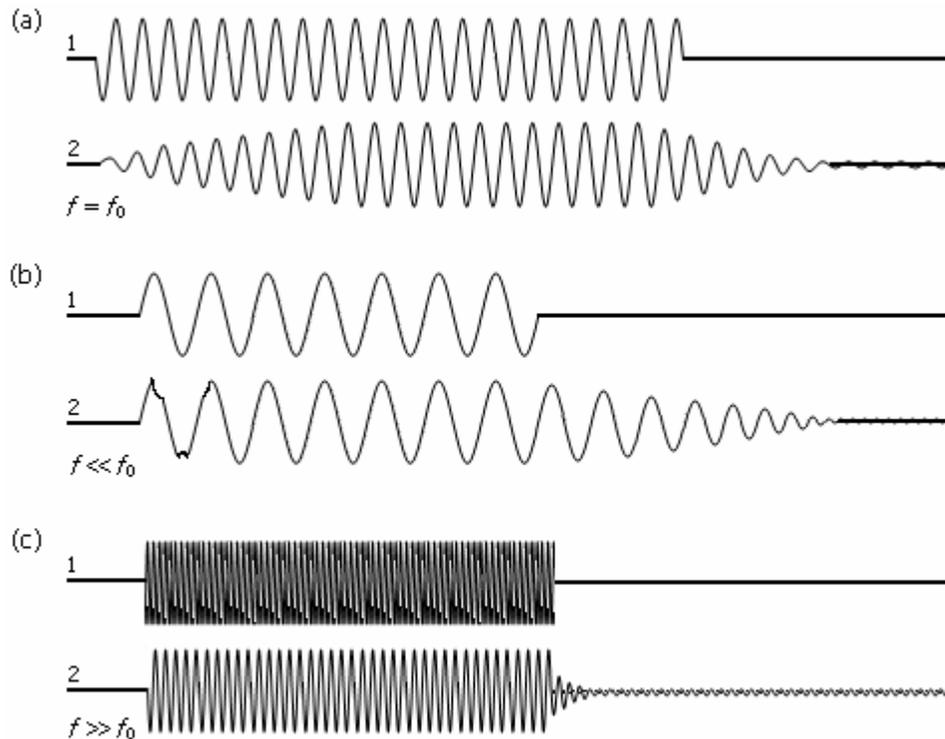


Fig. 3.5 Oscilaciones cuando la frecuencia aplicada es (a) igual a, (b) menor que, y (c) más grande que la frecuencia resonante f_0 (vibración natural). 1 = pulso excitante, 2 = pulso resultante.

A continuación se consideran algunos efectos que tiene el ancho de pulso en la detección de defectos, los cuales se deben tener en cuenta ^[22]:

- ☆ Cuando el pulso eléctrico de entrada es demasiado estrecho para que las vibraciones del transductor alcancen su máxima amplitud posible, la amplitud de la onda en el material de prueba nunca alcanzará su valor más alto posible; por tanto, se debe aplicar un pulso lo suficientemente ancho a fin de que permita obtener la amplitud máxima en las oscilaciones del transductor y así poder obtener una máxima detectabilidad de defectos.
- ☆ Un incremento en el ancho del pulso hace menos posible identificar por separado dos defectos que están ubicados muy cerca uno del otro como en la figura 3.6; pues si la distancia de separación entre los dos defectos es menor que el ancho de pulso, se obtendrá la señal de un solo defecto; por ejemplo, si la duración del pulso es 2 μ seg. y el ancho del pulso en acero es aproximadamente $\frac{1}{2}$ pulg. (1,2 cm), el operador no está

en capacidad de distinguir dos defectos que se hallen más cerca de $\frac{1}{4}$ pulg. uno del otro, ya que sus ecos respectivos se solaparían.

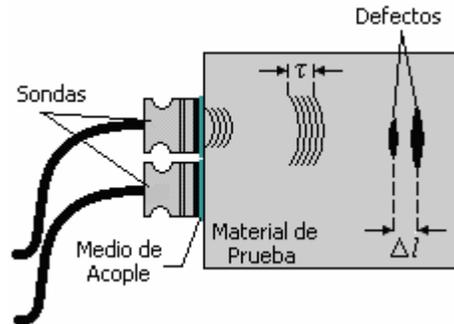


Fig. 3.6 Longitud del pulso y poder de resolución del método del pulso-eco

Con frecuencia se utiliza un solo transductor para la transmisión y recepción de ondas ultrasónicas, por lo que se puede obtener una señal muy amplia del pulso transmitido en la pantalla del osciloscopio; esto se debe a que el pulso eléctrico que puede tener una diferencia de potencial de algunos cientos de voltios alimenta directamente al receptor. El decaimiento de las oscilaciones del transductor después de haber cesado el pulso eléctrico también contribuye a esta señal; es decir, si durante el tiempo de decaimiento llega al transductor un eco relativamente pequeño de un defecto, la señal correspondiente a este defecto no se puede observar; luego, es imposible detectar los defectos ubicados en la región cercana a la superficie de un transductor, región denominada *zona muerta*, la cual tiene una estrecha relación con el tiempo de decaimiento del pulso en el transductor ^[22].

En conclusión, un incremento en el ancho del pulso eléctrico en principio facilita la detección de defectos; sin embargo, este incremento favorecerá un aumento en el ancho de la zona muerta y también en decremento en la capacidad de emisión del transductor ^[22].

Transductor: El área superficial de un transductor y su sensibilidad determina en gran parte el funcionamiento de un detector de defectos ultrasónico; pues un área superficial grande se asocia con una disminución del ángulo de divergencia del haz, y con un aumento en la cantidad de energía que llega al transductor receptor. Para un transductor de cuarzo, un aumento en el área superficial producirá un mejor acople con el circuito eléctrico cuando este sea utilizado como transmisor, receptor o ambos, facilitando así la producción de intensidades más altas ^[22].

El uso de transductores con áreas superficiales grandes solo se limita por la dificultad que presenta el trabajar con sondas muy grandes. Sin embargo, estos transductores se deben utilizar tanto como sea posible, sobre todo a bajas frecuencias donde la divergencia del haz es muy grande. La sensibilidad de un transductor depende de sus dimensiones, del tipo de polaridad que se este utilizando, y lo más importante, del tipo de material piezoeléctrico utilizado; por ejemplo, la sensibilidad de un transductor hecho de un cerámico como el titanato de bario, es mucho mayor que la sensibilidad de un transductor hecho de cuarzo; en

la práctica, los picos de los ecos obtenidos con los transductores cerámicos, son varias decenas más grandes que los picos de los ecos obtenidos con un cristal de cuarzo ^[22].

Acople de los transductores: Cuando un transductor ultrasónico se coloca en la superficie del material a ser examinado, este descansa sobre una capa de aire aún cuando las superficies del transductor y el material sean muy lisas en apariencia. Como la impedancia característica de un medio sólido es aproximadamente 100 veces mayor que la impedancia característica del aire, la reflexión que ocurre en la frontera transductor-aire es casi total, razón por la cual las ondas no entran en el material de prueba. Puesto que, la capa de aire entre el transductor y el material de prueba es muy delgada, se debe aplicar la ecuación 2.86, para analizar la transmisión de las ondas de ultrasonido a través de la capa. Por medio de esta ecuación, se puede mostrar que a las frecuencias (frecuencias del orden de los MHz) a las cuales se trabaja en la detección de defectos por ultrasonido, es poco probable que las ondas de ultrasonido penetren la capa de aire ^[22].

Normalmente se utiliza un líquido como aceite, glicerina, agua, etc. (Anexo B), para acoplar el transductor al material de prueba; por lo general, este líquido tiene una impedancia característica tan solo 20 o 30 veces menor que la impedancia característica del sólido. El líquido se esparce sobre la superficie del material y cuando el transductor es levemente presionado, una capa uniforme facilita el acople ^[22].

La suavidad de la superficie del material de prueba es de gran importancia pues entre más lisa sea la superficie, mejor es el acople y mayor la transmisión de las ondas de ultrasonido. Una situación excepcionalmente infortunada puede ocurrir cuando la rugosidad de la superficie es comparable con la longitud de onda, ya que ella puede afectar la longitud del tiempo de decaimiento de las oscilaciones del transductor, alterando con ello el ancho de pulso en el material ^[22].

Para obtener condiciones de trabajo independientes de los cambios del ancho de pulso durante el análisis de superficies rugosas, en las cuales puede haber una variación de la calidad del acople en diferentes sitios, se humedece el transductor cerca de su refuerzo con un material altamente absorbente que tenga una impedancia característica muy cercana a la impedancia característica del transductor, con lo cual mucha de la energía es absorbida por el material de refuerzo generando que se reduzca el ancho del pulso ultrasónico al tamaño del ancho del pulso eléctrico aproximadamente ^[22].

Después de largos periodos de uso, el transductor se desgasta debido a la fricción continua entre su superficie y la superficie del material de prueba. Por esta razón, se adapta a la superficie del transductor un forro protector de resina sintética; sin embargo, esto tiene como efecto una disminución en la amplitud de las ondas que pasan hacia el interior del material, además de producir el ensanchamiento del pulso debido a las numerosas reflexiones múltiples que ocurren en el material del forro ^[22].

Distancia transductor – defecto: El nivel observado del eco del defecto depende también de la distancia entre el transductor y el defecto; esto se debe principalmente a la forma

como son reflejadas las ondas desde el defecto. En el lugar en el cual el defecto es pequeño comparado con la longitud de onda, ocurre el fenómeno de dispersión de las ondas en todas las direcciones y el nivel del eco del defecto disminuirá en relación con el cuadrado de la distancia; sin embargo, aquel sitio en el cual el defecto es grande comparado con la longitud de onda, permite que la superficie del defecto este perpendicular a la dirección de las ondas, que ocurra reflexión regular y que disminuya el eco del defecto en proporción a la primera potencia de la distancia. Estos son los dos extremos que se dan en la detección de defectos por ultrasonido, aunque normalmente el tamaño de los defectos considerados se encuentra entre ellos ^[22].

La figura 3.7 permite observar el resultado de medir la variación del nivel del eco del defecto con respecto a la distancia, desde el transductor a un defecto artificial en la forma de un hueco taladrado. A una frecuencia de 5 MHz en la que la longitud de onda es comparable con el diámetro del defecto, se encontró que la dependencia del nivel del eco con la distancia l esta en algún punto entre l^{-1} y l^{-2} ^[22].

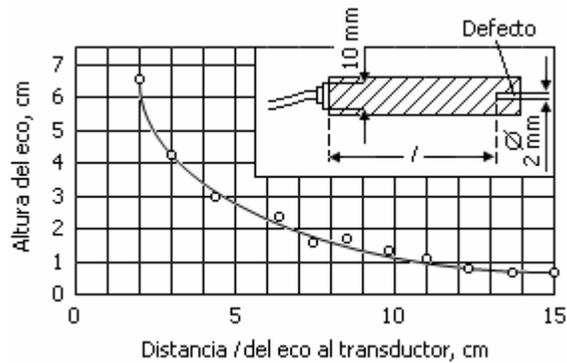


Fig. 3.7 Medida de la altura del eco como función de la distancia del defecto al transductor; $f = 5 \text{ MHz}$ y $\lambda = 1 \text{ mm}$

En un medio altamente absorbente, se puede observar de la ecuación $p = p_0 e^{-\alpha l}$, que el nivel del eco del defecto disminuye con la distancia a una razón mayor que el cuadrado de la distancia; por tanto, los defectos que se hallan situados más cerca del transductor son detectados con mayor facilidad que los otros, permitiendo determinar en el momento en que se realiza una prueba que el transductor este tan cerca como sea posible a cualquier región que puede ser sospechosa ^[22].

Hasta ahora se ha considerado solamente el campo lejano. En el campo cercano las condiciones para la detección de defectos son más ventajosas debido a que la intensidad del haz de ultrasonido es más alta; sin embargo, la distancia límite entre los campos cercano y lejano a^2/λ desde el transductor, por lo general no es grande ^[22].

Tamaño del defecto: debido a defectos tales como: fisuras, huecos, laminaciones, etc., medios de contenido gaseoso que tienen una impedancia característica que difiere ampliamente de la impedancia característica de los sólidos en los que ocurren, las ondas

ultrasónicas incidentes a ellos son reflejadas casi en su totalidad. El análisis matemático del fenómeno de reflexión de un defecto es muy complicado, debido a las formas irregulares y a las posiciones aleatorias del defecto. Sin embargo, se puede distinguir entre dos tipos de defectos, mucho más grandes o mucho más pequeños que la longitud de onda ^[22]:

- a) En el caso de defectos con dimensiones mucho más grandes que la longitud de onda, las leyes geométricas de reflexión permanecen validas (Figura 3.8). Si la superficie del defecto es plana y orientada en forma angular con respecto a las ondas hay un cambio en la dirección del eco. Para detectar este tipo de defectos se debe trabajar con dos transductores.
- b) Los defectos que tienen dimensiones mucho más pequeñas que la longitud de onda presentan el fenómeno de dispersión. En estos defectos sólo una parte del haz incidente se refleja, y las ondas reflejadas son dispersadas en diferentes direcciones; en este caso se pueden aplicar las leyes geométricas de reflexión. Existe un valor crítico en el tamaño del defecto por debajo del cual no se puede detectar su presencia; este es el tamaño de grano predominante en el material; si las dimensiones del defecto son mucho más grandes que las dimensiones de los granos, se puede seleccionar una frecuencia para la cual la longitud de onda es mucho más grande que el tamaño del grano pero comparable con las dimensiones del defecto; luego, las ondas no pueden ser afectadas por los granos pero serán reflejadas por el defecto. Sin embargo, si las dimensiones del defecto son comparables con el tamaño de grano, las ondas serán reflejadas desde los granos así como desde el defecto, obteniendo como resultado una serie de ecos de los cuales no se puede distinguir el eco del defecto.

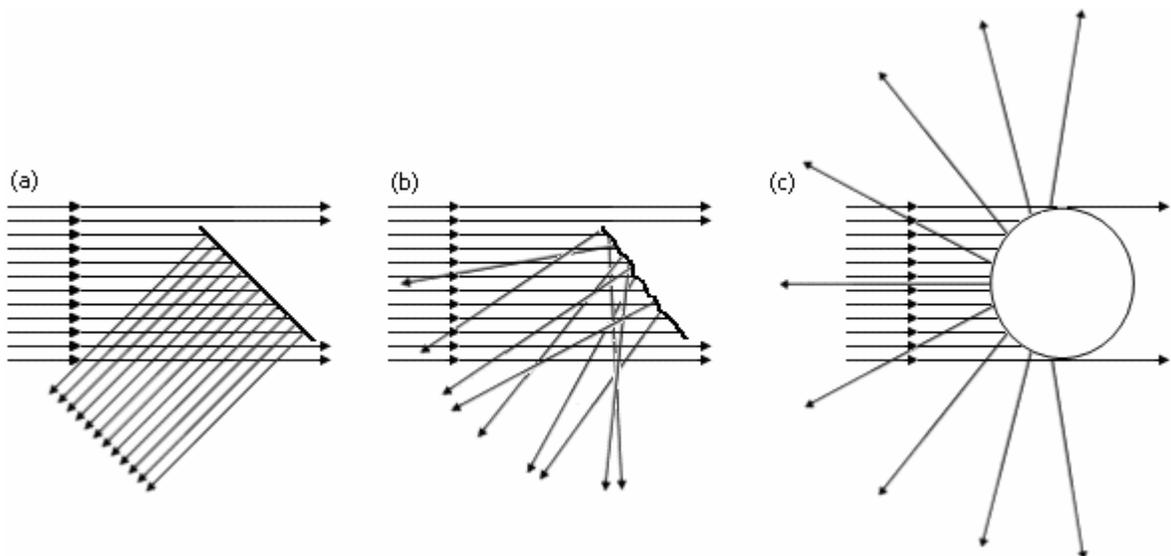


Fig. 3.8 Reflexión de ondas de varios defectos que tienen dimensiones mucho más grandes que la longitud de onda.

De las consideraciones anteriores se puede apreciar que el tamaño del eco del defecto depende de manera muy compleja del tamaño del defecto, además de depender de su forma, posición y orientación, así como de la longitud de onda.

Características del circuito eléctrico: para implementar el circuito eléctrico que se requiere en un aparato para detectar defectos a través del método del pulso-eco se deben tener en cuenta las siguientes conclusiones generales ^[22]:

- ☆ La capacidad para detectar defectos depende en primer lugar de la sensibilidad del receptor y de la potencia del transmisor.
- ☆ La persona que realiza la prueba no tiene influencia sobre alguno de estos factores.

La explicación anterior de la detección de defectos que utiliza el método del pulso-eco es completamente cualitativa; sin embargo, es posible realizar un análisis cuantitativo que relacione los diferentes factores que influyen en la medida.

3.4.2.3.3 Ventajas y desventajas del método del pulso-eco ^[22].

☆ Ventajas:

- ✗ Alta sensibilidad, lo cual permite la detección de defectos muy pequeños, aún en grandes muestras de material.
- ✗ Sólo se necesita de una superficie para acceder al material de prueba; esto es importante en aquellos materiales que poseen sólo una superficie accesible.

☆ Desventajas:

- ✗ El tamaño de grano del material de prueba debe ser más pequeño que el defecto más pequeño a ser examinado; pues de lo contrario, los ecos de los granos individuales enmascararán cualquier eco de los defectos.
- ✗ Las reflexiones de los contornos de grano o de las partes rugosas de las superficies de los materiales que tienen una extensa estructura de grano y/o superficies desiguales, no permiten ninguna reflexión apreciable desde los defectos.
- ✗ La potencia de resolución está limitada por el ancho de pulso, lo que hace que este método no sea recomendable para el análisis de delgadas muestras de material.
- ✗ Este método es limitado para pequeños espesores de material, dado que resulta imposible analizar ecos que estén muy cerca uno del otro. Esta limitación no se debe confundir con la *zona muerta*, la cual se puede eliminar cuando se utilizan dos sondas inclinadas en ángulo una con respecto a la otra, fig. 3.9; ó por el uso de ondas transversales con una sola sonda transmisora-receptora, fig.3.10; sin embargo, la primera variación del método no permite separar el eco del defecto del eco de fondo, para un defecto muy cercano a la superficie opuesta del material, y la segunda variación no permite detectar los ecos de los defectos paralelos a la superficie del material.

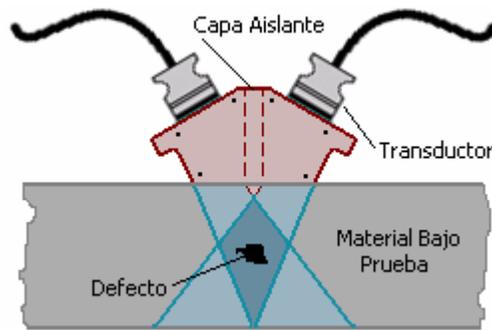


Fig. 3.9 Eliminación de la zona muerta mediante el uso de dos sondas inclinadas angularmente una respecto a la otra.

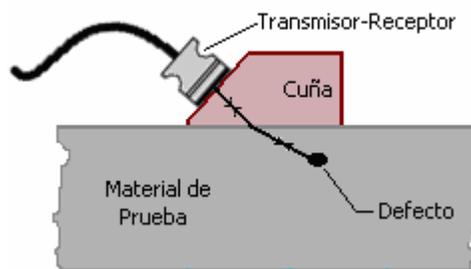


Fig. 3.10 Eliminación de la zona muerta por el método del pulso-eco

3.4.3 Formatos de presentación de los datos.

Las señales de ultrasonido que retornan del material de prueba requieren de algún tipo de formato que permita su visualización para poder ser interpretadas. En la Evaluación no Destructiva generalmente se trabaja con tres tipos de presentación de datos, conocidos como *modo-A* o *scan-A*, *modo-B* o *scan-B* y *modo-C* o *scan-C*; cada uno de ellos proporciona una visualización diferente de la región del material que está siendo examinada [37] y [38].

- ☆ **Presentación en modo-A ó Scan- A:** Es el formato de despliegue de información más conocido y utilizado. Y consiste en la presentación de la señal de ultrasonido que se recibe, como una función del tiempo (figura 3.11).

La mayoría de los instrumentos con presentación en modo-A permiten que la señal sea desplegada en su forma natural de radiofrecuencia (RF), como una señal de RF totalmente rectificadas, o como la mitad positiva o negativa de la señal RF. En este tipo de presentación un defecto se localiza por la indicación en el eje del tiempo que produce el reflejo de la onda sonora, y el tamaño del defecto se estima en función del tamaño del reflejo que éste produce, o comparando la amplitud de la señal obtenida del defecto desconocido con la amplitud de la señal de un defecto conocido [37] y [38].

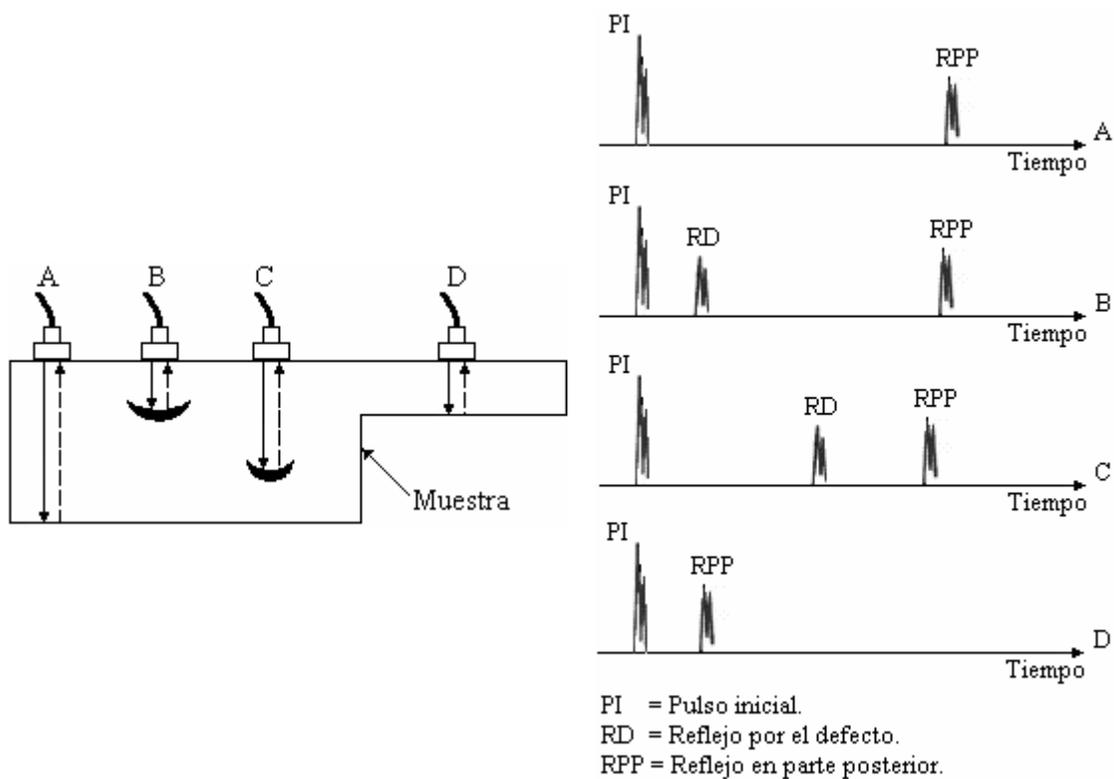


Fig. 3.11 Respuestas típicas de la evaluación, tipo A (Scan-A) para diferentes posiciones. La respuesta en el transductor se muestra como función del tiempo.

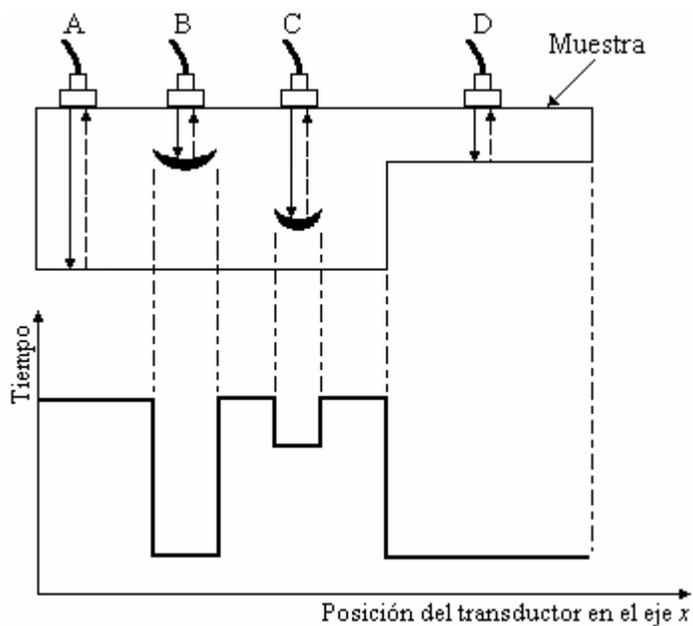


Fig. 3.12 Respuesta típica del barrido, tipo B. La respuesta del transductor se muestra como función de una coordenada espacial (eje x).

- ☆ **Presentación en modo-B ó Scan-B:** Posee un formato en el cual se sincroniza el tiempo de retorno de la señal con la posición geométrica del transductor en un eje determinado (figura 3.12). En este caso, se grafica el tiempo de reflexión como función de la posición; por tanto, permite determinar la profundidad del defecto y sus dimensiones lineales aproximadas en la dirección del barrido ^{[37] y [38]}.

La presentación en modo-B equivale a un corte transversal de la pieza en el cual se muestra el perfil del espesor entre las superficies frontal y posterior, y los defectos se manifiestan como cambios en dicho perfil. La principal ventaja radica en la facilidad para conocer la distribución geométrica de los defectos (figura 3.12) ^[37].

- ☆ **Presentación en modo-C ó Scan-C:** En la figura 3.13 se observa la imagen que se obtiene con este tipo de barrido. La presentación **modo-C** proporciona una traza de tipo plano de la localización y del tamaño de las características de la muestra de prueba. El plano de la imagen es paralelo al patrón de barrido del transductor y consiste básicamente en una grafica del tiempo de reflejo de la señal sonora en un plano coordenado de dos dimensiones. La amplitud relativa de la señal o el tiempo de vuelo se relaciona con una escala de colores, y los defectos se manifiestan por los cambios que estos registran. La presentación en **modo-C** proporciona una imagen de las características que reflejan y dispersan el sonido dentro de la muestra y en las superficies de la misma ^{[37] y [38]}.

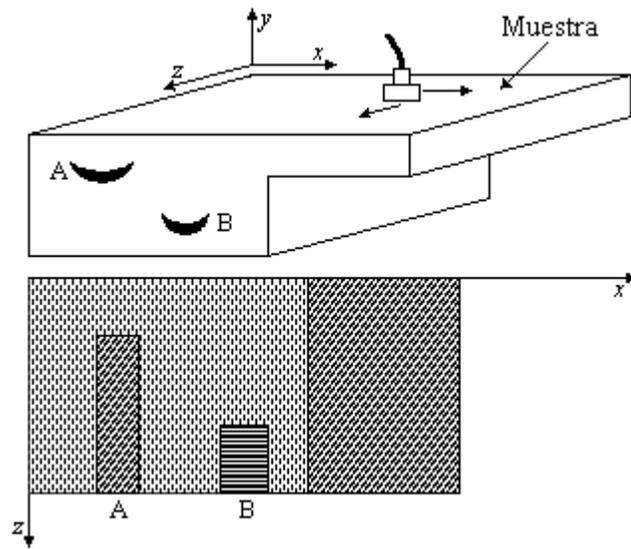


Fig. 3.13 Respuesta típicas del barrido, tipo C (Scan-C). La respuesta del transductor se da como función del espacio en dos dimensiones(x,y)

Una aplicación ventajosa de este tipo de presentación se observa cuando se puede relacionar con planos o dibujos de las piezas que se inspeccionan, facilitando la interpretación y el análisis de los resultados. En la figura 3.13, se indica la profundidad relativa, forma, tamaño y localización de los defectos en una pieza. Observe que la grieta A se presenta en un plano diferente que la grieta B y su longitud es mayor ^[37].

4. EL TRANSDUCTOR

Aunque en el capítulo anterior se hizo una breve introducción al tema del transductor, en este capítulo se abordará de manera más amplia, pues no se puede ignorar la importancia que tiene el transductor en cualquier sistema ultrasónico, ya que de él depende la aplicación que se desee realizar. Pues, si se desea realizar una aplicación específica, se debe prestar mucha atención al momento de seleccionar el transductor apropiado.

El transductor es el único elemento que genera y recibe ondas de ultrasonido, además de relacionar componentes acústicas con dispositivos electrónicos del sistema ultrasónico. Los demás elementos del sistema se limitan al manejo de las señales eléctricas, y al acondicionamiento electrónico y procesamiento digital de las mismas. De lo anterior se deduce que el transductor es un componente crítico del sistema ultrasónico, y si éste no funciona adecuadamente, tampoco lo hará el resto del sistema.

A continuación se hace una descripción detallada del transductor lo mismo que de su cable conector, pues en cualquier sistema ultrasónico no se puede analizar las características del uno sin tener en cuenta las características del otro.

4.1 EL TRANSDUCTOR ULTRASÓNICO

También conocido como transductor piezoeléctrico, es tal vez la parte más importante del sistema de instrumentación ultrasónica, que se encarga de la transformación de pulsos eléctricos en vibraciones mecánicas (ondas acústicas) y de la transformación de las vibraciones mecánicas retornantes en pulsos eléctricos ^[39] y ^[40].

4.1.1 Características físicas del transductor ultrasónico.

Muchos factores, incluyendo el material, la construcción mecánica y eléctrica, y las condiciones externas de carga mecánica y eléctrica, influyen en el comportamiento de un transductor. La construcción mecánica incluye parámetros tales como área superficial de radiación, amortiguamiento mecánico, encapsulado, tipo de conector y otras variables de la construcción física ^[40].

La siguiente figura permite observar los diferentes componentes físicos que integran un transductor ultrasonido. Aunque todos ellos cumplen una función especial para el óptimo funcionamiento del transductor, existen tres componentes, los que por su importancia es necesario describir. Estos componentes son ^[17]:

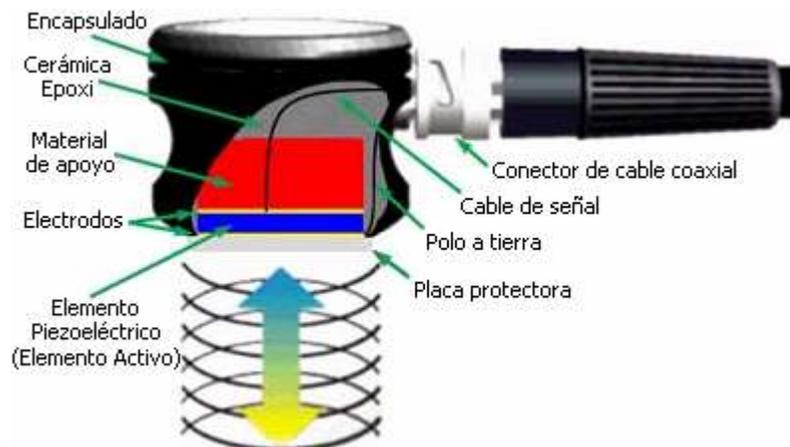


Fig. 4.1 Corte de un típico transductor de contacto.

- ☆ **El elemento activo (cristal):** es el corazón del transductor, pues convierte la energía eléctrica en energía acústica, y viceversa. Y consiste básicamente, en un pedazo de material polarizado a través de los electrodos unidos a dos de sus caras opuestas. Cuando se aplica un campo eléctrico al material, las moléculas polarizadas se alinean con el campo, dando como resultado dipolos inducidos dentro de la estructura molecular o cristalina del material; esta alineación de moléculas genera un cambio en las dimensiones del cristal, fenómeno conocido como *electrostricción*. Además, si un material como el cuarzo (SiO_2) o el titanato de bario (BaTiO_3) es permanentemente polarizado, se producirá un campo eléctrico cuando las dimensiones del material cambien como resultado de una fuerza mecánica impuesta. Este es el fenómeno que conocemos como *efecto piezoeléctrico* ^[39].

Los materiales más utilizados como elemento activo de un transductor son las cerámicas polarizadas, las cuales son cortadas de diversas maneras a fin de producir diferentes formas de onda. Actualmente se están utilizando nuevos materiales como piezopolímeros y compuestos (Anexo - C).

- ☆ **El material de apoyo:** es usualmente un fuerte atenuador. Material de alta densidad que se utiliza para controlar las vibraciones del transductor, mediante la absorción de la energía radiada por la cara trasera del elemento activo ^[17].

Cuando la impedancia acústica del material de apoyo es igual a la impedancia acústica del elemento activo, el resultado es un transductor fuertemente amortiguado, con un buen rango de resolución pero con una baja amplitud de señal. Si existe diferencia entre la impedancia acústica del elemento activo y la impedancia acústica del material de apoyo, mayor energía acústica será emitida hacia el material en prueba. Este último resultado será un transductor con menor resolución debido a la mayor duración de la onda, pero con una mayor amplitud de señal o sensibilidad ^{[17] Y [40]}.

- ☆ **La placa protectora:** Es la encargada de proteger el elemento transductor del entorno. En el caso de transductores de contacto, la placa protectora debe ser duradera y resistente a la corrosión ^[17].

Para algunos transductores, como los de inmersión, los de emisión angular y los de línea de retardo, la placa protectora tiene el propósito adicional de servir de transformador acústico entre la alta impedancia acústica del elemento activo y: el agua, la cuña o la línea de retardo ^[17].

4.1.2 Especificaciones técnicas del transductor ultrasónico.

Además de las características físicas de un transductor se tienen las características o especificaciones técnicas del mismo, las cuales permiten determinar el tipo de transductor que se requiere para una aplicación determinada; estas características son:

- ☆ **Resolución:** Es la capacidad que posee un transductor ultrasónico para distinguir entre dos señales cercanas en tiempo o profundidad que han sido reflejadas desde el material de prueba. Esto se traduce en la distancia mínima entre dos reflectores para que estos sean detectados como defectos independientes ^{[17] y [32]}.

Al utilizar un haz de ultrasonido, nuestra unidad de medida es la longitud de onda del haz; por tanto, no se puede diferenciar dos defectos cuya separación sea menor que la longitud de onda. De este modo, cuanto menor sea la longitud de onda mayor será la resolución del transductor, situación que requiere un alto grado de amortiguamiento del transductor ^{[32] y [40]}.

Existen tres tipos de resolución, las cuales se relacionan con la distribución espacial del haz ultrasónico dentro del material de prueba, y se describen a continuación ^{[17], [30] y [41]}:

- × **Resolución axial:** Capacidad del transductor para entregar señales simultáneas y distintas de dos reflectores ubicados muy cerca uno del otro, con respecto al eje de propagación del haz ultrasónico dentro del material de prueba ^{[17] y [32]}.
- × **Resolución lateral:** es la capacidad que posee el transductor para diferenciar entre dos defectos localizados en un plano perpendicular al haz ^[32].
- × **Resolución superficial:** Capacidad del transductor para detectar reflejos localizados cerca de la superficie de la pieza de prueba ^[17].
- ☆ **Eficiencia** Algunos transductores se fabrican para ser excelentes transmisores y otros para ser excelentes receptores (Anexo - D). Por tanto, un transductor que funciona bien en una determinada aplicación no siempre producirá los resultados deseados en una aplicación diferente ^[40].
- ☆ **Sensibilidad:** es la capacidad que posee un transductor para detectar un defecto a una profundidad determinada en un material de prueba. Cuanto mayor es la señal recibida

del defecto, mayor será la sensibilidad del transductor. La sensibilidad a defectos pequeños es proporcional al producto de la eficiencia del transductor como transmisor y como receptor^{[17] y [40]}.

- ☆ **Frecuencia central:** es la frecuencia conocida del transductor y depende del material de apoyo. Los transductores que son altamente amortiguados responden a frecuencias superiores e inferiores de la frecuencia central, lo que suministra un amplio rango de frecuencia que se traduce en un transductor con alta energía de resolución. Los transductores menos amortiguados poseen un rango de frecuencia más estrecho, una energía de resolución más escasa, pero un mayor poder de penetración. Por tanto, la frecuencia central define en parte las capacidades del transductor; cristales de baja frecuencia (0.5 MHz – 2.25 MHz) proporcionan mayor energía y penetración en un material, mientras que los cristales de alta frecuencia (15 MHz – 25 MHz) proporcionan una penetración reducida pero mayor sensibilidad a las discontinuidades pequeñas.^[40].
- ☆ **Ancho de Banda:** Es el rango de frecuencia en el cual la amplitud de la onda ultrasónica decae en un 50%, es decir que sufre una atenuación de -6 dB^[40].

4.1.3 Forma de onda y espectro del transductor.

El análisis de la forma de onda del transductor y del espectro de frecuencia, se hace según las condiciones de prueba y las definiciones de la ASTM E1065 (Sociedad Americana para la Evaluación y el Procedimiento Numérico de los Materiales). Las unidades típicas son: los MHz para el análisis en frecuencia, el μs para el análisis de la forma de onda y el dB (nivel logarítmico relacionado con la amplitud) para medir la amplitud de la señal. En la figura 4.2 se ilustra la duración de una forma de onda a -14 dB de atenuación o al 20% de la amplitud máxima, la forma de onda de -40 dB de atenuación, corresponde a un 1% de la amplitud máxima; luego, la dispersión es mayor a -40dB dado que el 1% de la onda contiene muy poca energía y por ende muy poco efecto en el análisis del ancho de banda^[17].



Fig. 4.2 Forma de onda.

En las figuras siguientes se observa la frecuencia central y el ancho de banda a -6 dB de atenuación, y la relación entre el ancho de banda y la duración de la onda.

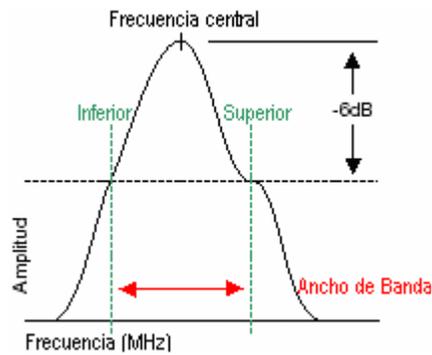


Fig. 4.3 Espectro de frecuencia y ancho de banda.

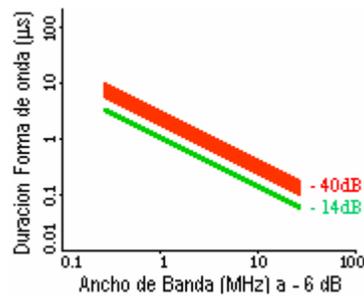


Fig. 4.4 Relación entre el ancho de banda y la duración de la onda.

4.1.4 Campo acústico irradiado por el transductor.

El ultrasonido que emite un transductor piezoeléctrico no se origina en un punto, sino en la mayor parte de la superficie del elemento activo; es por esto que los transductores de forma cilíndrica son conocidos como transductores de fuente de pistón, pues el campo acústico que ellos emiten se asemeja a una masa cilíndrica delante del transductor ^[42].

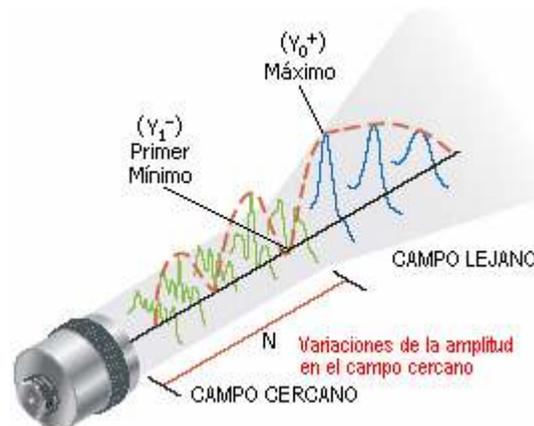


Fig. 4.5 Campo acústico de un transductor

El campo acústico de un transductor se halla dividido en: campo cercano y campo lejano (figura 4.5). El campo cercano es la región inmediata al transductor, donde el eco y la

amplitud tienen una serie de máximos y mínimos, y termina en el último máximo a una distancia N del transductor. La localización del último máximo es conocida como *distancia del campo cercano* (N ó Y_0^+) y es el foco natural del transductor ^[17].

En el campo cercano la intensidad del ultrasonido a lo largo del haz se ve afectada por la interferencia constructiva y destructiva de la onda, fenómeno que se conoce como difracción en el mundo de la Evaluación no Destructiva. Debido a las variaciones acústicas que ocurren dentro del campo cercano, puede ser extremadamente difícil evaluar con precisión los defectos que se sitúan dentro de esta área, si se utilizan técnicas basadas en el análisis de amplitud ^{[17] y [42]}.

La distancia del campo cercano es una función que depende de la frecuencia del transductor, el diámetro del elemento y la velocidad del sonido en el material de prueba, como se observa en las siguientes ecuaciones ^[17]:

$$N = \frac{D^2 f}{4c} \quad (4.1)$$

y

$$N = \frac{D^2}{4\lambda} \quad (4.2)$$

Donde:

- N ≡ Distancia del campo cercano
- D ≡ Diámetro del elemento
- f ≡ Frecuencia
- c ≡ Velocidad del ultrasonido en el material de prueba
- λ ≡ Longitud de la onda acústica.

El campo lejano es el área más allá de N , donde las variaciones de amplitud que caracterizan el campo cercano cambian a una amplitud que decae suavemente en este punto y el haz de ultrasonido es más uniforme. Es en esta área donde la onda acústica es bien comportada y su potencia es máxima; por lo tanto, se obtendrán resultados óptimos en la detección de defectos cuando ellos sucedan aquí ^{[17] y [42]}.

4.1.5 Dispersión del haz del transductor.

Aunque se dijo que los transductores de fuente de pistón tienen un campo acústico cuya forma se asemeja a una masa cilíndrica delante del transductor, la energía del haz no permanece cilíndrica, sino que se dispersa fuera de él, propagándose a través del material. A este fenómeno acústico generalmente se le conoce como *haz dispersado* o como *difracción ultrasónica*. Aunque la dispersión del haz se debe considerar cuando se realiza una inspección ultrasónica, es importante observar que en el campo lejano o *zona de Fraunhofer*, la máxima presión acústica se encuentra siempre a lo largo del eje del

transductor. Por lo tanto, es probable que la reflexión más fuerte venga directamente del área delante del transductor (campo cercano) ^[43].

La dispersión del haz ocurre porque la partícula que vibra dentro del material (a través del cual está viajando la onda acústica) no siempre transfiere toda su energía en la dirección de propagación de la onda. Si las partículas no se alinean directamente en la dirección de propagación de la onda, algo de la energía se logrará transferir hacia afuera en dirección angular. Esta dispersión se determina en gran parte por la frecuencia y el diámetro del transductor. Pues al utilizar un transductor de baja frecuencia la dispersión del haz es mayor que cuando se utiliza un transductor de alta frecuencia; así mismo, al aumentar el diámetro del transductor la dispersión del haz se reduce ^[43].

El fenómeno de difracción es una consideración importante que se debe tener en cuenta en el momento de seleccionar el transductor, por las siguientes razones ^[43]:

- ☆ La dispersión del haz disminuye la amplitud de las reflexiones dado que los campos acústicos son menos concentrados y, por lo tanto, más débiles.
- ☆ La dispersión del haz puede dar lugar a una mayor dificultad de interpretar las señales debido a las reflexiones de los lados laterales del objeto de prueba u otras características fuera del área de inspección.

4.1.6 Clasificación de los transductores.

Los transductores ultrasónicos se hallan clasificados en grupos, de acuerdo a la aplicación para la cual han sido diseñados. Esta clasificación es:

- ☆ **Transductores de contacto:** se utilizan en las inspecciones de contacto directo y se operan manualmente al presionarlos suavemente sobre la superficie de prueba luego de haber colocado una sustancia de acople. El transductor de contacto se halla disponible en una amplia variedad de configuraciones y sus componentes se encuentran protegidos dentro de una cubierta resistente que soporta el contacto deslizante sobre los materiales de prueba ^{[18] y [44]}.

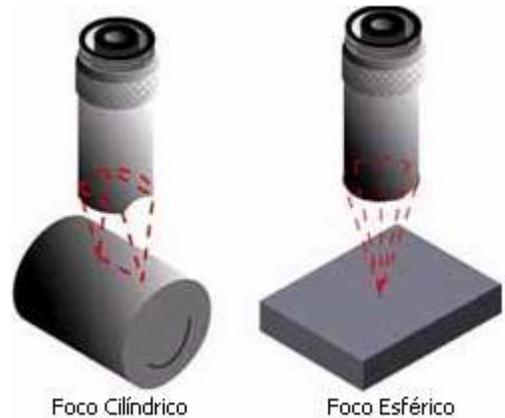


El transductor de contacto es un transductor plano de haz normal que emite ondas longitudinales con frecuencias entre 0.5 MHz y 10 MHz, y se utiliza en inspecciones de piezas con superficies relativamente planas en las que se puede colocar la unidad de prueba sobre el área de interés. Para este tipo de inspecciones se imponen dos condiciones: que la resolución de la superficie cercana no sea un factor determinante y que las discontinuidades a detectar sean paralelas a la superficie de contacto ^{[18] y [44]}.

El transductor de contacto es útil en la detección de discontinuidades y en la medición de espesores ^[18].

- ☆ **Transductores de inmersión:** estos transductores no entran en contacto con el material de prueba y se hallan diseñados para operar en un ambiente líquido, por lo que todas sus conexiones son herméticas ^[44].

Los transductores de inmersión utilizan por lo general una capa de acople de impedancia que les ayuda a transmitir más energía acústica al medio líquido, y por tanto al material de prueba ^[44].

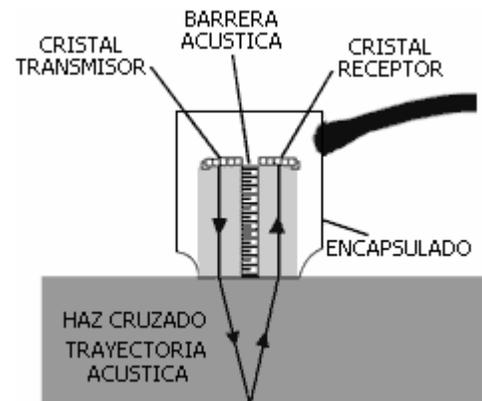


Los transductores de inmersión se encuentran disponibles en tres configuraciones diferentes: desfocalizados (llano), esféricamente focalizados (punto) y cilíndricamente focalizados (línea). Esta configuración puede variar entre focalizados y deslocalizados mediante la adición de una lente, ya sea de enfoque cilíndrico o de enfoque esférico ^[17] y ^[44].

Los transductores desfocalizados se utilizan en aplicaciones generales y en la penetración de materiales densos, mientras que los transductores esféricamente focalizados son utilizados para mejorar la sensibilidad a pequeños defectos y la resolución axial al concentrar la energía acústica a un área más pequeña; así mismo, los transductores cilíndricamente focalizados al mejorar sus especificaciones técnicas de sensibilidad y resolución se utilizan en la inspección de tuberías ^[17] y ^[44].

- ☆ **Transductores de elemento dual:** estos transductores contienen dos elementos activos que funcionan independientemente dentro de una sola cubierta, donde uno de los elementos transmite y el otro recibe ^[44].

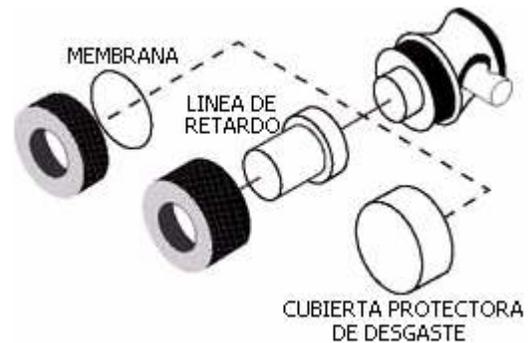
Las características de los transductores de elemento dual dependen de los elementos activos que ellos posean, pues se pueden obtener transductores que proporcionen una señal muy limpia, y transductores para aplicaciones especiales, como la inspección de la dirección del grano dentro del material de prueba ^[44].



Los transductores de elemento dual están bien adaptados para hacer medidas en aplicaciones donde los defectos se hallan muy cerca del transductor. Y son muy útiles para hacer medidas de espesores de materiales finos y para inspeccionar defectos

cercanos a la superficie. Los dos elementos activos tienen una disposición angular en su interior a fin de crear una trayectoria acústica de haz cruzado dentro del material de prueba ^[44].

- ☆ **Transductores con línea de retardo:** son sencillos transductores de ondas longitudinales que se utilizan junto con una línea de retardo removible, la cual puede hacer que el transductor sea eficaz para una amplia gama de aplicaciones ^{[17] y [44]}.

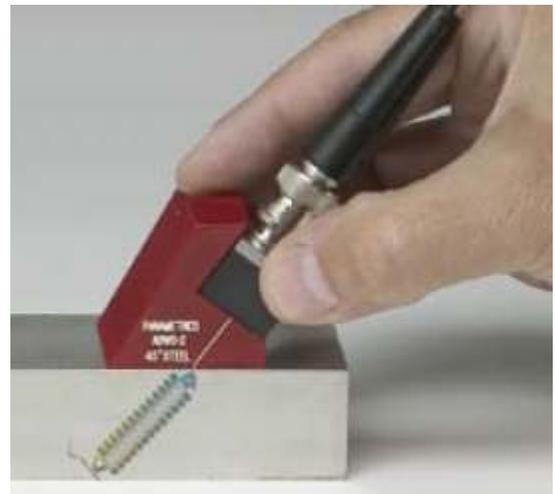


Como su nombre lo indica, la función primaria de un transductor con línea de retardo es introducir un tiempo de retardo entre la generación de la onda acústica y la llegada de cualquier onda reflejada, permitiendo que el transductor termine su función transmisora antes de comenzar su función receptora, esto con el fin de mejorar la resolución de la superficie cercana ^[44].

Estos transductores se diseñaron para ser utilizados en aplicaciones tales como alta precisión en la medida de espesores de materiales delgados y en aplicaciones de medida a altas temperaturas, dado que la línea de retardo proporciona un cierto aislamiento térmico al elemento activo ^{[17] y [44]}.

- ☆ **Transductores de haz angular y zapatas:** generan ondas transversales, superficiales y de placa ^[18].

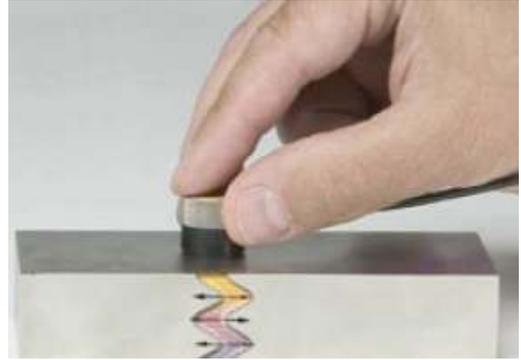
Los transductores de haz angular se construyen acoplando un transductor de incidencia normal a una de las caras de una zapata de plástico, la cual posee un determinado ángulo de refracción. Estos transductores son empleados en la implementación de la técnica de pulso eco y su aplicación es casi exclusiva en la detección de discontinuidades orientadas perpendicularmente a la superficie del material de prueba ^[44].



El ángulo de refracción del sonido en un transductor angular esta definido por la zapata que sea utilizada, pues ellas vienen referenciadas con los ángulos más comerciales. Por ejemplo, para el acero se tienen zapatas de 35, 45, 60, 70 y 80 grados ^[18].

- ☆ **Transductores de onda transversal con incidencia normal:** son únicos, pues permiten la introducción directa de ondas transversales en un material de prueba sin la utilización de una zapata de haz angular ^[44].

Estos transductores son empleados para medir la velocidad de una onda transversal en un material. Esta medida junto con la medida de la velocidad longitudinal se utiliza para calcular la razón de Poisson, el modulo de Young y el modulo de cizalla del material ^[17].



4.1.6 Excitación de un transductor ultrasónico.

El máximo voltaje de excitación se debe limitar a aproximadamente 50 voltios por milésima de pulgada del grosor del cristal piezoeléctrico; dado que, los cristales piezoeléctricos de baja frecuencia suelen ser gruesos y los cristales piezoeléctricos de alta frecuencia delgados, se puede utilizar a una diferencia de potencial negativa de 600 voltios, de rápido tiempo de ascenso (fast rise time) y corta duración, a través de los terminales de un transductor de 5 MHz y frecuencias inferiores. Para transductores de 10MHz, la diferencia de potencial se debe reducir a la mitad, esto es a 300 voltios (aprox.) medidos a través de los terminales ^[17].

Aunque se recomiendan picos de excitación negativos, se pueden utilizar ondas continuas o ráfagas de excitación, teniendo en cuenta las siguientes limitaciones ^[17]:

- ☆ La potencia media disipada por el transductor no debe exceder los 125 mW para evitar el sobrecalentamiento del transductor y la despolarización del cristal.
- ☆ Dado que la potencia media depende de varios factores tales como: voltaje, ciclo útil de funcionamiento e impedancia eléctrica del transductor, se pueden utilizar las siguientes ecuaciones para estimar la duración de la máxima excitación, así como el número de ciclos de una ráfaga, para mantenerse dentro del limite de potencia máxima:

$$V_{rms} = \frac{1}{2}(0.707)V_{p-p} \quad (4.3)$$

$$P_{tot} = \frac{(C_{UF})(V_{rms})^2 \cos \varphi}{Z} \quad (4.4)$$

$$C_{raf} = \frac{f \times C_{UF}}{T_{rep}} \quad (4.5)$$

Donde:

- V_{p-p} \equiv Voltaje pico a pico.
- P_{tot} \equiv Potencia total.
- C_{raf} \equiv Ciclos de ráfaga.
- C_{UF} \equiv Ciclos de funcionamiento útil.
- T_{rep} \equiv Tasa de repetición.
- Φ \equiv Angulo fase.
- Z \equiv Impedancia nominal de entrada

4.2 EL CABLE CONECTOR.

El cable conector de un transductor ultrasónico es generalmente un cable coaxial compuesto por tres partes muy importantes: el conductor, el dieléctrico, y la trenzilla blindada. Estos tres componentes están rodeados por una cubierta protectora exterior. En la figura 4.6 se observa la sección transversal de un cable coaxial convencional. El conductor se encarga de la conexión positiva del cable mientras la trenzilla blindada actúa como tierra. El dieléctrico es el aislante entre el conductor y la trenzilla blindada ^[17].

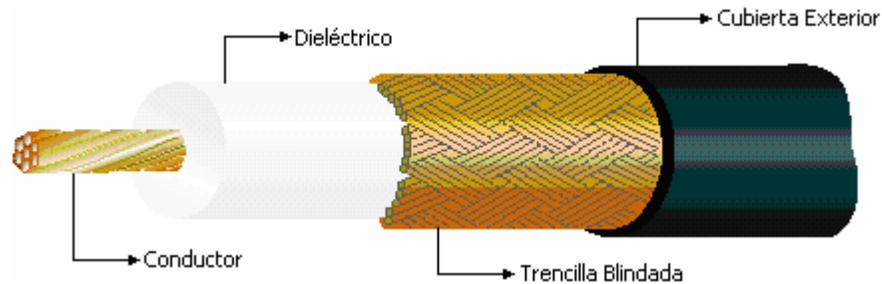


Figura 4.6 Cable coaxial.

La mayoría de los cables coaxiales tienen una capa de trenzilla blindada. Sin embargo, para evitar totalmente la interferencia eléctrica del ambiente los cables coaxiales doblemente blindados tienen una capa adicional de trenzilla blindada. Cada transductor viene diseñado para un tipo de conector especial, que depende de la aplicación en la que se vaya a emplear (Anexo - E) ^[17].

La impedancia característica de un cable coaxial se determina por la razón entre el diámetro interno del conductor externo (D) y el diámetro externo del conductor interno (d) y por la constante dieléctrica (ϵ) del material aislante entre los conductores (ecuación 4.6) ^[17].

$$\text{impedancia } (Z_0) = \frac{138}{\sqrt{\epsilon}} \log(D/d) \Omega \quad (4.6)$$

Los valores más comunes de la impedancia eléctrica en los cables coaxiales son 50 Ω , 75 Ω , y 95 Ω . Observe que la impedancia real de entrada a una frecuencia particular puede ser muy diferente de la impedancia característica del cable debido a la impedancia de la fuente

y de la carga. En ultrasonido, en la etapa de transmisión la fuente es el generador de señal y la carga es el transductor; mientras que en la etapa de recepción la fuente es el transductor y la carga es el receptor. La impedancia compleja de los generadores de señal y los transductores reflejará un poco de energía eléctrica en cada extremo del cable coaxial. La cantidad de reflexión se determina por la longitud del cable, la frecuencia de la señal RF, y la impedancia eléctrica del cable y su acabado ^[17].

4.3 CARACTERIZACIÓN DE UN TRANSDUCTOR ULTRASÓNICO.

Antes de iniciar el diseño de la aplicación en la cual se va a utilizar el transductor ultrasónico es importante realizar la caracterización del mismo, pues ella permite conocer el comportamiento real del transductor en una aplicación determinada.

Aunque existen varios niveles de caracterización de un transductor ultrasónico, se analizará el método más básico que permite conocer las propiedades eléctricas del transductor. Para este tipo de calibración se requiere de personal calificado y de los siguientes elementos ^[45]:

- ☆ Un emisor o generador de pulsos calibrado: este generador debe cumplir estrictamente las especificaciones técnicas del transductor con el fin de preservar el cristal o elemento activo de posibles daños por sobrecarga. Además se recomienda empezar con niveles bajos de voltaje hasta conseguir la excitación del cristal; esto ocurre cuando la señal del eco sea visible en la pantalla del osciloscopio.
- ☆ Un osciloscopio que maneje frecuencias del orden de los 50 MHz ó más.
- ☆ Bloques de calibración.

Dentro de las propiedades eléctricas que posee un transductor, las más importantes para la evaluación no destructiva son:

- ☆ **Forma de onda del pulso ultrasónico:** La respuesta obtenida del transductor es una señal de radiofrecuencia (RF) en el dominio del tiempo, esta señal es originada por el pulso ultrasónico sin rectificar del eco proveniente del bloque de calibración, utilizando la técnica de pulso eco. Dicho pulso se puede observar a través de la pantalla del osciloscopio (Figura 4.7), y contiene mucha información. En función de su amplitud, longitud (duración) y forma, se puede determinar la resolución y sensibilidad del transductor, su factor de amortiguamiento (tiempo requerido para retornar al estado de reposo), su frecuencia central y la existencia de armónicas ^[45].
- ☆ **Espectro de Frecuencias:** Al someter la señal que se visualiza en el osciloscopio a un análisis espectral nos dará la respuesta del transductor en el dominio de frecuencias (Figura 4.8). El espectro de frecuencias que se obtiene contiene mucha información, y permite conocer ^[45]:
 - ✗ La frecuencia central (corresponde con la máxima amplitud en el espectro de frecuencias).

- ✗ El ancho de banda del transductor (que dará idea de su resolución).
- ✗ El factor de calidad (Q).
- ✗ El factor de amortiguamiento (B).
- ✗ La existencia de armónicas.

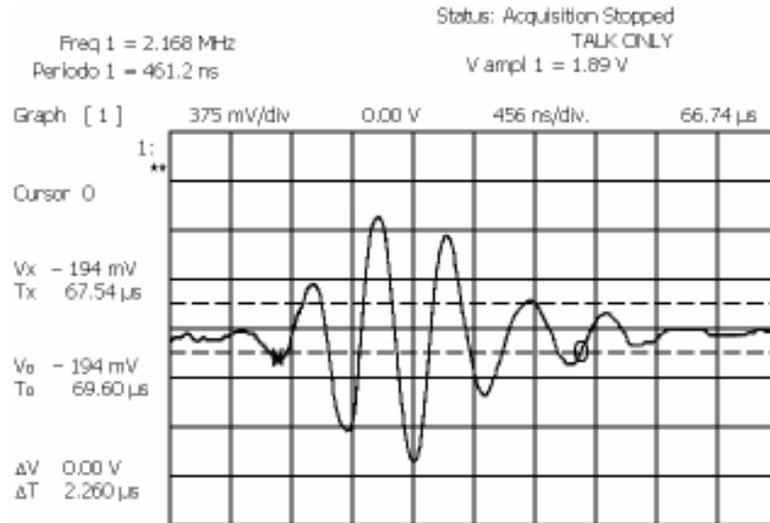


Figura 4.7 Pulso ultrasónico observado en la pantalla del osciloscopio.

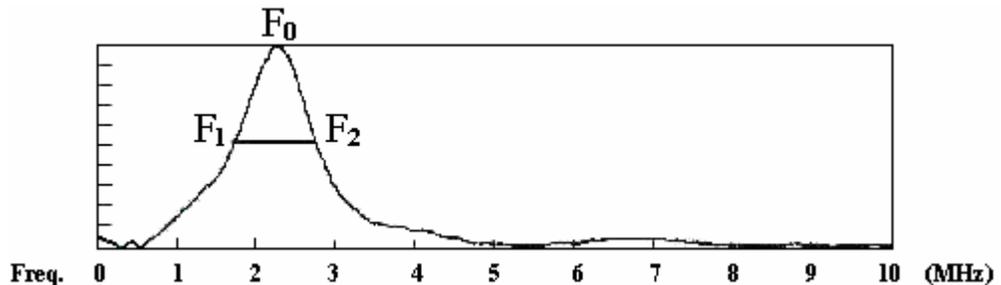


Figura 4.8 Espectro de frecuencia del pulso de la figura 4.7

Algunos de estos parámetros para una aplicación determinada se obtienen de la siguiente manera:

- ✗ El factor de calidad del transductor ultrasónico se obtiene a partir de la ecuación ^[45]:

$$Q = \frac{f_0}{f_2 - f_1} \quad (4.7)$$

donde:

f_0 \equiv Frecuencia central del transductor

$f_2 - f_1$ \equiv Ancho de banda del transductor (donde f_1 es la frecuencia mínima y f_2 es la frecuencia máxima definidas juntas con una caída de -6dB con respecto al máximo)

- ✦ El factor de amortiguamiento (B) que se define como la inversa de Q ^[45]:

$$B = \frac{1}{Q} = \frac{f_2 - f_1}{f_0} \quad (4.8)$$

- ✦ Y el porcentaje de ancho de banda que se obtiene del factor de amortiguamiento del transductor $B\%$ ^[45]:

$$B\% = \left(\frac{f_2 - f_1}{f_0} \right) \times 100 \quad (4.9)$$

Del espectro de frecuencia también se puede observar que un transductor con excitación pulsada, no irradia una frecuencia única. Además un espectro de frecuencias deformado será la consecuencia de la despolarización parcial del material piezoeléctrico, de la falta de paralelismo entre sus caras o de la existencia de problemas en su capa protectora ^[45].

Con este capítulo se da por terminada la fundamentación teórica del proyecto, con la cual se procuró dar una visión muy amplia de la física del ultrasonido, de su proyección a diversos campos de la industria y de algunas de las técnicas que han sido implementadas en la Evaluación no Destructiva. Todo esto con el fin de crear los fundamentos necesarios para enfrentar el diseño del analizador ultrasónico.

El diseño del analizador ultrasónico estará enmarcado dentro de las diversas opciones que ofrece el Ultrasonido Industrial, y permite conjugar dos aspectos de mucho interés para el Ingeniero Físico, el primero la aplicación a un problema real de los conocimientos científicos obtenidos de la fundamentación teórica, y el segundo, la capacidad que se debe desplegar para realizar el diseño del dispositivo, diseño que debe estar acorde con las características especiales que tiene el transductor y que exige el tratamiento de una señal de alta frecuencia.

5. DISEÑO DEL ANALIZADOR ULTRASONICO

5.1 INTRODUCCION

A nivel industrial, el ultrasonido se utiliza como principio físico en muchas aplicaciones relacionadas con la evaluación no destructiva. En este campo se han desarrollado diversos equipos de análisis estructural, equipos que van desde los medidores de espesores hasta los más sofisticados analizadores de defectos con visualización de resultados en tres dimensiones.

En esta etapa, se debe tener en cuenta que cada aplicación o ensayo ultrasónico requiere de un diseño específico en el que se tienen que optimizar los componentes del sistema. Pues por un lado se tiene las características del transductor que condicionan las especificaciones técnicas que debe tener la generación de la perturbación mecánica, y por el otro la determinación del tratamiento más adecuado del eco de respuesta para extraer la información deseada, ya sea una imagen, una medida, la evaluación de un defecto, etc.

5.2 DISEÑO.

El diseño del analizador ultrasónico lo determina en gran parte el tipo de inspección que se desee implementar. Para este caso en particular la técnica seleccionada desde el inicio del proyecto es la técnica del pulso-eco. Técnica ampliamente conocida en nuestro medio, ya sea a través de las ecografías, el análisis de los fondos marinos (SONAR), el fenómeno que facilita la locomoción de algunos animales como el murciélago, etc.

Como el analizador ultrasónico es un dispositivo con aplicabilidad en el campo industrial, se deben tener en cuenta las siguientes especificaciones al momento del diseño^[46]:

Tipo de propagación: Longitudinal, transversal, superficial, de Lamb, etc.

Velocidad del ultrasonido: 0.3 m/s – 6500 m/s.

Rango de frecuencias: 0.1 MHz – 50 MHz.

Resolución axial: Muy importante.

Resolución lateral: Importante.

Material de acople: Diverso (sólido, líquido, gaseoso).

Barrido: Mecánico.

Procesamiento digital de la señal: Sí.

Presentación de resultados: Estática (scan A, scan B ó scan C).

Frecuencia de repetición del pulso (máximo): 20 KHz.

Tipo de inspección: Pulso-eco, transmisión, resonancia, etc.

Tamaño del medio explorado: Hasta decenas de Kms.

Aplicación: Medida (cuantitativa), Diagnostico (cualitativa).

Para definir de manera precisa las especificaciones a tener en cuenta en el diseño de la aplicación, se hace necesario establecer algunas condiciones de acuerdo con las características del transductor y con las características del medio objeto de exploración.

☆ **Características del transductor:** para la implementación del analizador ultrasónico se cuenta con dos transductores ultrasónicos de la firma Panametrics, los cuales se describen a continuación:

Un A107S-RB: palpador de contacto directo, de ondas longitudinales, con una frecuencia central de 5 MHz, diámetro de la superficie de contacto de 1 pulg. y un conector microdot a BNC.

Un A409S-RB: palpador de haz angular con zapatas de 45°, 60° y 70°, de ondas transversales, una frecuencia central de 5 MHz, y un conector microdot a BNC.

☆ **Características del medio a explorar:** Estas características dependen del tipo de material seleccionado como objeto de análisis. Durante el desarrollo del proyecto se decidió que la implementación del analizador ultrasónico estaría dirigida al análisis de materiales metálicos, en especial, los que se citan en el Anexo - A. Estos materiales tienen unos rangos de velocidad de propagación de (2160 a 6320) m/s para ondas longitudinales y de (700 a 3240) m/s para ondas transversales.

Al relacionar las características del transductor con las características del medio a explorar se pueden establecer parámetros como:

☆ **Forma de onda ó pulso de excitación:** El transductor tiene una frecuencia de trabajo de 5 MHz, es decir un periodo de 0,2 μ s. Por tanto, se requiere la generación de una señal con esa frecuencia que sea capaz de excitarlo. El fabricante sugiere la utilización de picos de voltaje con dicha frecuencia; sin embargo, cumplir con este requerimiento es muy difícil, pues los dispositivos electrónicos que se consiguen en el país poseen limitaciones técnicas para trabajar a altas frecuencias.

Es así como después de analizar la situación se toma la decisión de trabajar con trenes de pulsos ó ráfagas de tono, de manera similar a como lo hizo el fabricante según la hoja de prueba (Anexos F y G) de cada transductor.

Para establecer el numero de ciclos del tren de pulsos, se usó como referencia la hoja de prueba del transductor A107S - RB, de la cual se deduce que el fabricante utilizó una señal multipulsada que contiene un ancho de pulso de $T_w \approx 0.9 \mu$ s, para una muestra de sílice que posee una velocidad de propagación de 5960 m/s para ondas longitudinales, velocidad muy similar a la velocidad que posee el acero para este tipo de ondas (Anexo - A). Por lo tanto, como una buena aproximación se decidió que los trenes de pulsos contengan como mínimo 5 ciclos, esto es un ancho de pulso de:

$$\begin{aligned}
T_w &= N^\circ \text{ de ciclos} \times T_{Tx} \\
&= 5 \times 0.2 \mu s = 1.0 \mu s
\end{aligned}
\tag{5.1}$$

donde;

$T_{Tx} \equiv$ Periodo del transductor.

Para determinar el tiempo de transición (T_T) entre el modo de transmisión y el modo de recepción del transductor, se toma como referencia la mínima distancia que puede recorrer el tren de pulsos a la velocidad de propagación más alta de los metales objeto de estudio, de tal forma que no haya interferencia entre el pulso que emite el transductor y el eco que regresa. Este tiempo es el tiempo de vuelo que utiliza el tren de pulsos para recorrer esa distancia, y se determina con facilidad al cumplir la condición ^[47]:

$$T_T = T_{vuelo} \gg T_w \tag{5.2}$$

donde;

$T_T \equiv$ Tiempo de transición del transductor.

Por lo tanto, si $T_T = 4T_w$ el tiempo de transición es de $4 \mu s$. Se ha tomado este valor que estrictamente cumple con la condición, buscando que el tamaño del material no sea muy grande ya que esto es una limitación del sistema. Pues si un defecto se localiza a una distancia inferior a la de la distancia mínima con seguridad no podrá ser detectado por el transductor de contacto directo, para el cual los defectos serán invisibles en el rango de $0m - D_{\min} m$ ($D \equiv$ distancia); este fenómeno se debe a la interferencia que puede haber entre la señal de salida y el eco, ó a que la señal eco quede enmascarada por la señal que se refleja en la interfaz transductor-material de prueba.

El rango en el cual resulta difícil la detección de un defecto se denomina *zona muerta del transductor* y por tanto del analizador ultrasónico. Esta zona se puede corregir mediante la utilización del palpador de haz angular, pues su señal presenta un tiempo de retraso para entrar al material debido a la zapata que utiliza.

Para concluir con el análisis de la forma de onda, se debe determinar el tiempo de repetición (T_R) del tren de pulsos, el cual debe cumplir con la condición ^[47]:

$$T_R \gg T_T \tag{5.3}$$

El tiempo de repetición del tren de pulsos esta estrechamente relacionado con el máximo espesor para el cual se diseña el analizador ultrasónico; pues este no es más que el tiempo de vuelo para el máximo espesor que se pretende explorar con el analizador ultrasónico en el metal (seleccionado) que posee la velocidad de propagación más baja. Si se considera un espesor máximo de exploración de $0.5 m$ para una muestra de plomo, el tiempo de vuelo que utiliza la señal para recorrerlo es:

$$\begin{aligned}
 T_R &= \frac{2(D_{\min})}{V_L} \\
 &= \frac{2(0.5)m}{2160m/s} \approx 0.463 s = 463 ms
 \end{aligned}
 \tag{5.4}$$

Por lo anterior se puede asumir un $T_R = 500 ms$, es decir una frecuencia de repetición del tren de pulsos de 2 Hz.

- ☆ **Tamaño del material que se va a explorar:** Las dimensiones del metal a explorar con el analizador ultrasónico se definen a través del tiempo de transición del transductor y de su distancia focal, del periodo de repetición del tren de pulsos, y del valor máximo y mínimo de las velocidades de propagación del ultrasonido en los metales seleccionados.

Para definir el tamaño mínimo del metal cuando se utilice el palpador de contacto directo, se toma el tiempo de transición $T_T = 4 \mu s$, como tiempo de vuelo de la señal en el material y la máxima velocidad de propagación del ultrasonido en los metales seleccionados. Esta velocidad le corresponde al aluminio que tiene una $V_L = 6320 m/s$; sin embargo ampliamos un poco el rango y la aproximamos a $6500 m/s$. Ahora, al despejar D_{\min} de la ecuación 5.4 se tiene:

$$\begin{aligned}
 (D_{\min}) &= \frac{T_T \times V_L}{2} \\
 &= \frac{(4 \times 10^{-6} s) \cdot 6500 m/s}{2} \\
 &\approx 0.013 m \approx 13 mm
 \end{aligned}$$

Por tanto, el tamaño mínimo para una inspección con el palpador de contacto directo en cualquiera de los metales seleccionados es de 1.3 cm.

La definición del tamaño máximo resulta un poco arbitraria, pues basta con conocer la distancia del campo cercano o la distancia focal del transductor, para establecer un tamaño que supere estas distancias.

Existen dos formas de obtener dicha distancia: la primera a través de las ecuaciones 4.1 ó 4.2 y la segunda al utilizar la tabla que anexa el fabricante (Anexo - H). Para el caso de las ecuaciones, se toma la menor velocidad de propagación de la onda longitudinal en los metales seleccionados (2160 m/s para una muestra de plomo). Sin embargo, para ampliar un poco el rango, el valor de la velocidad se aproximó 2000 m/s. Así, resolviendo cualquiera de las ecuaciones se obtiene que el transductor A107S - RB, tiene un campo cercano aproximado de 0.39 m. Si se recurre a la tabla se observa que un palpador de 5 MHz de la firma Panametrics tiene una distancia focal aproximada de

13 pulg o 33 cm. Por lo tanto se considera apropiado el valor escogido de 0.5 m como máximo espesor de exploración del analizador ultrasónico.

Como conclusión de este minucioso análisis se redefinen las especificaciones técnicas de carácter industrial, teniendo en cuenta las características del transductor y las características de los metales seleccionados, además de los parámetros establecidos a partir de ellas:

Tipo de propagación: Longitudinal y transversal.

Velocidad del ultrasonido: 2000 m/s – 6500 m/s.

Frecuencia de los transductores: 5 MHz.

Resolución axial: No muy buena ^[17].

Sensibilidad: Muy buena ^[17].

Material de acople: líquido (glicerina).

Barrido: Mecánico.

Procesamiento digital de la señal: Sí.

Presentación de resultados: Estática (scan A).

Forma de la onda: Tren de pulsos o ráfagas de tonos.

Frecuencia de repetición del tren de pulsos (máximo): 2 Hz.

Tipo de inspección: Pulso-eco.

Tamaño del medio explorado: El analizador ultrasónico se diseña para explorar muestras cuyo tamaño se encuentre en el rango de (1.5 a 50) cm, para el transductor A107S - RB. Mientras que para el transductor A409S - RB, no existe limite inferior.

Aplicación: Diagnostico (cualitativa).

Con estas especificaciones se procede al diseño del analizador ultrasónico tomando como referencia el transductor A107S - RB, pues las especificaciones de trabajo que se establecen para él se pueden extender al transductor A409S - RB; dado que ambos transductores tienen una frecuencia central de 5 MHz.

El diseño del analizador ultrasónico se divide en 5 etapas (figura 5.1), cada una de las cuales será analizada con detenimiento a fin de facilitar la comprensión del diseño total.

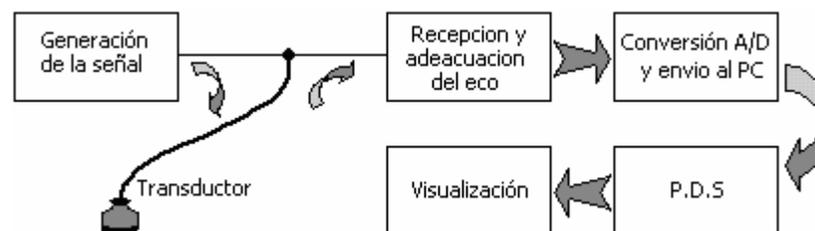


Fig. 5.1 Principales componentes de un sistema de evaluación por ultrasonidos.

5.2.1 Diseño de la etapa de generación de la señal.

Es una de las etapas más importantes en el diseño del analizador ultrasónico, pues de ella depende el funcionamiento del transductor.

En la información suministrada por el fabricante sobre las características de funcionamiento de los transductores (Anexo - I), el sugiere que estos de deben excitar con un pico de voltaje negativo de hasta 600 Voltios y recomienda que: “sí la señal generada es un tren de pulsos o una ráfaga de tonos, la potencia total disipada no debe exceder los 0.125 Watios”.

Al solicitar un tope mínimo del voltaje de excitación el fabricante responde que eso depende de la aplicación; sin embargo recomienda variar el nivel de voltaje hasta obtener la excitación del transductor, empezado con un voltaje de ensayo de unos 40 Voltios para una señal monopulsada, mientras que para una señal multipulsada el voltaje de ensayo puede ser menor.

Haciendo una abstracción de la información anterior se establecen las siguientes condiciones que se deben tener en cuenta en el diseño de esta etapa:

- ☆ La señal de excitación es un tren de pulsos, compuesto por 5 ciclos de 5 MHz de frecuencia cada uno, el ancho del tren de pulsos será de 1 μ s y la frecuencia con la cual se repite el tren de pulsos es de 2 Hz.
- ☆ La potencia total máxima que puede disipar el transductor sin riesgo de sobrecarga o despolarización del elemento activo, no debe exceder los 125 mW.
- ☆ La impedancia de los transductores en su frecuencia central es de aproximadamente 150 Ω (Anexo - I) y la impedancia del conector de 50 Ω .
- ☆ Como la señal de excitación es un tren de pulsos, se recomienda utilizar niveles de voltaje pequeños hasta obtener la excitación del transductor y un nivel de respuesta aceptable. Esto con el fin de preservar el transductor.

Con base en las consideraciones anteriores, el diseño del generador de los trenes de pulsos se compone de dos partes fundamentales: la generación de la forma onda del tren de pulsos y la adecuada amplificación de la misma señal, de tal forma que permita la excitación del transductor.

Para la implementación del generador del tren de pulsos se recomienda utilizar el PIC 18F452, cuyas especificaciones técnicas permiten obtener las características relacionadas con los periodos y frecuencias de la señal. Por ahora, solamente se analiza la forma como se obtiene la señal de excitación del transductor, ya que el PIC es el dispositivo encargado de ejercer el control en la etapa de conversión A/D y comunicación con el PC, donde su funcionamiento se analizara en forma más detallada.

El PIC se configura para que opere en modo HS con un cristal de 20 MHz (figura 5.2). La señal que se obtiene en el oscilador se envía al modulo de contadores que actúan como divisores de frecuencia en la etapa de conversión A/D y comunicación con el PC, de donde se obtiene una señal con una frecuencia de 5 MHz (2^{do} bit de salida del contador 1). El paso de esta señal a la etapa de amplificación se hace a través de una compuerta de paso tipo AND, controlada por el pin RA1 del PIC a través del cual se comunican las instrucciones encargadas de darle la forma al tren de pulsos.

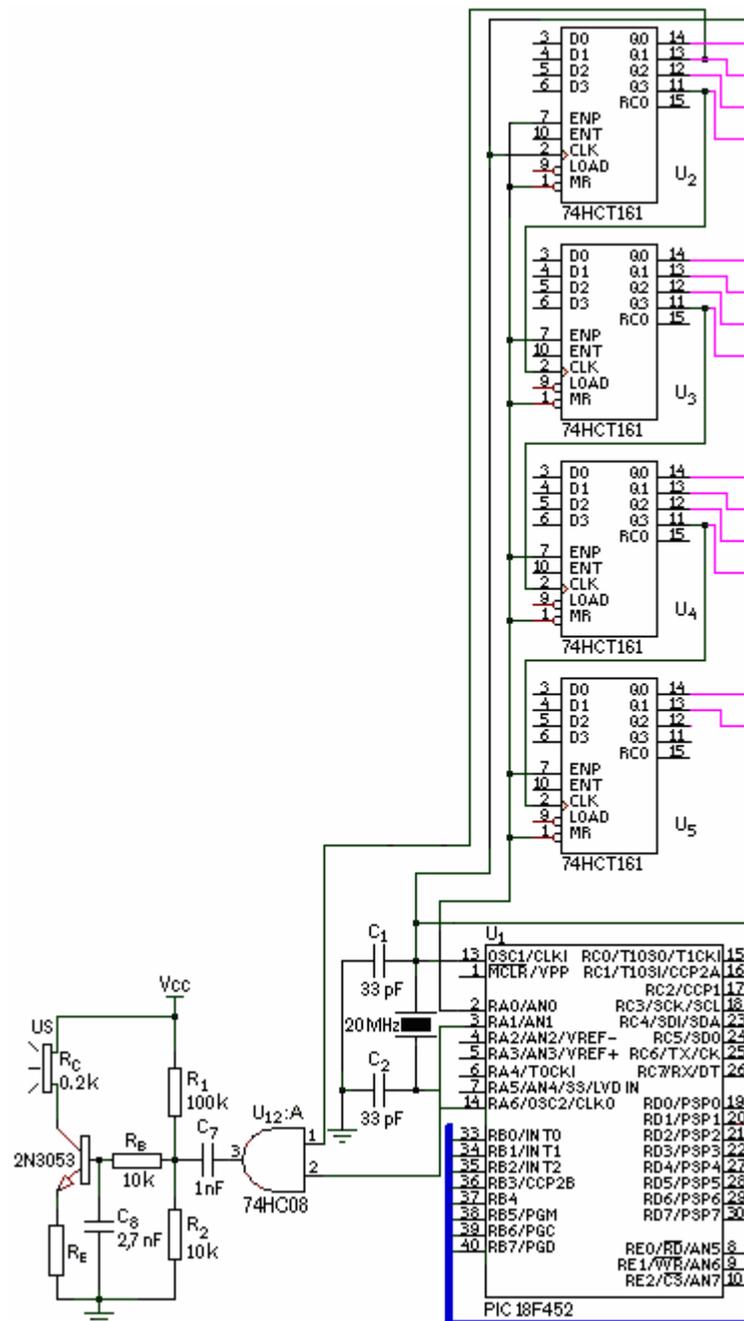


Fig. 5.2 Circuito del generador de pulsos.

La señal que entrega la compuerta pasa a la etapa de amplificación compuesta por el transistor 2N3053, el cual se configura teniendo en cuenta las siguientes especificaciones técnicas ^[48]:

- ☆ Voltaje colector-emisor: 50 Vdc.
- ☆ Voltaje base-colector: 80 Vdc.
- ☆ Voltaje base-emisor: 5.0Vdc.

- ☆ Corriente de colector: 700 mAcd.
- ☆ Potencia total disipada: 5.0 Watts.
- ☆ Ganancia corriente DC ($I_C = 150$ mAcd y $V_{CE} = 10$ Vdc): $h_{FE} = 50_{\min}$ y 250_{\max} .
- ☆ Frecuencia de trabajo: $f_T = 100$ MHz.

Como el transistor es un dispositivo de mediana potencia y alta frecuencia de trabajo que permite la amplificación de señales de radio frecuencia, se puede configurar como un amplificador de señal pequeña (figura 5.3), con el cual se busca amplificar la corriente de base para darle al transductor la corriente necesaria que le facilite la excitación ^[49].

El nivel de voltaje que se le aplica al transductor es aproximadamente igual al voltaje que se tenga en V_{CC} , por lo tanto para cumplir con el requerimiento sugerido por fabricante, este valor debe variar desde valores bajos a valores altos de voltaje hasta alcanzar la excitación del transductor.

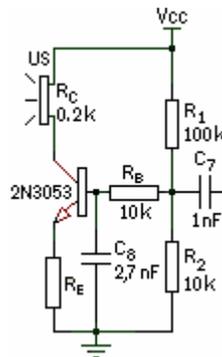


Fig. 5.3 Amplificador de señal pequeña.

El circuito anterior está compuesto por: las resistencias R_1 y R_2 que se encargan de polarizar adecuadamente el transistor, a través del divisor de voltaje que forman con la fuente V_{CC} ; la resistencia R_B que limita la corriente de base; la resistencia R_E que se utiliza para compensar el emisor; el condensador C_7 ó condensador de paso que sirve para desacoplar la salida del voltaje de polarización de la compuerta AND y el condensador C_8 que junto a la resistencia R_B conforman una red RC que sirve de filtro pasabajos para atenuar los armónicos de la señal de entrada. Como que la resistencia R_C o resistencia del transductor es muy pequeña, se recomienda que R_E tienda a cero de modo que no haya caída de voltaje a través de ella.

5.2.2 Diseño de la etapa de acondicionamiento de señal.

La etapa de adecuación de la señal es la encargada de recibir la señal eco del transductor-receptor, darle un nivel aceptable de amplificación y eliminar parte del ruido que la contamina. Esta etapa estará compuesta por un módulo de amplificación, un módulo de filtrado y nuevamente un módulo de amplificación (figura 5.4).



Fig. 5.4 Etapa de acondicionamiento de la señal eco.

Para el desarrollo de esta etapa se deben tener en cuenta tres aspectos importantísimos, los cuales se convierten en las condiciones de diseño a tener en cuenta, estos aspectos son:

- ☆ La señal eco que se recibe del transductor-receptor es muy pequeña del orden de los mV, como se observa en la hoja de prueba suministrada por el fabricante (Anexo F).
- ☆ Como la frecuencia central del transductor es de 5 MHz, y la aplicación que se está desarrollando está orientada al campo industrial, la señal eco recibida estará contaminada por ruido, ya sea de señales parasitas con frecuencias semejantes a la frecuencia del transductor o por el ruido que se adiciona en las conexiones del circuito eléctrico.
- ☆ El ancho de banda debe ser superior a 3.69 MHz. Este ancho de banda se obtiene de la hoja de prueba aportada por el fabricante para una atenuación de -6 dB o 20 % en un material tipo sílice.

Para la implementación del primer módulo de amplificación se sugiere el Circuito Integrado LM837 de la National Semiconductors. Este integrado es un amplificador de bajo ruido, gran ancho de banda y alta velocidad de respuesta ^[50].

Entre las características más destacadas del LM837 se tienen ^[50]:

- ☆ Velocidad de subida de voltaje (Slew Rate): 10 V/us
- ☆ Ancho de banda de 0 dB: 25 MHz.
- ☆ Máxima carga que soporta: > 600 ohmios.
- ☆ Voltaje de ruido de entrada: $4.5\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$
- ☆ Distorsión armónica Total: 0.0015%
- ☆ Voltaje de Offset: 0.3mV

La señal de entrada V_{in} (eco) que entrega el transductor-receptor es del orden de los mV (de acuerdo a la literatura consultada y a la hoja de prueba entregada por el fabricante). Por lo tanto, se toman valores aproximados a 200 mVp, esto es 400 mVp-p, como voltaje de entrada al sistema; a partir de él se hace el diseño correspondiente de esta etapa. No se debe olvidar que el transductor se comunica con el sistema a través del conector BCM-74 del tipo BNC a Microdot, el cual posee una impedancia de 50Ω (Anexo - E).

Para adaptar la señal al sistema, esta será amplificada por el LM837 (Amplificador Operacional) en configuración no inversora como se observa en la siguiente figura.

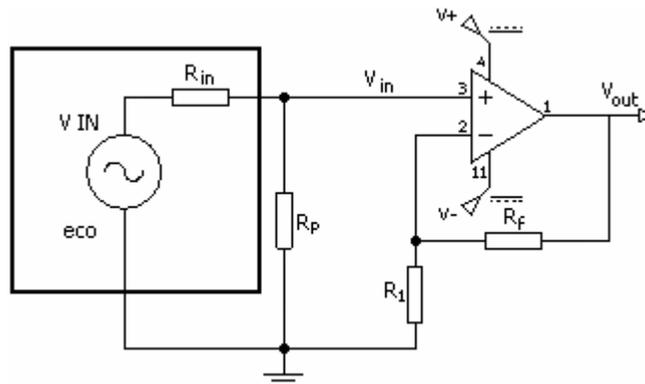


Fig. 5.5 Circuito amplificador.

Es adecuado realizar una amplificación de la señal al nivel de los voltios. Por lo tanto, se propone una salida de 1.6 V , para la cual las ecuaciones de diseño se plantean de la siguiente forma ^[51]:

$$A_v = 1 + \frac{R_f}{R_1} \quad (5.5)$$

y

$$A_v = \frac{V_{out}}{V_{in}} \quad (5.6)$$

Dado que $V_{out} = 1.6V_p$ y $V_{in} = 0.2V_p$, de la ecuación 5.6 se tiene:

$$A_v = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1.6V_p}{0.2V_p} \cong 8V/V$$

Por condiciones de diseño que impone el integrado R_1 y R_f no pueden ser menores a $1\text{ K}\Omega$. Luego, si $A_v \cong 8$ y $R_1 = 1\text{ K}\Omega$ de la ecuación 5.5 se obtiene que:

$$R_f = 7 \times 1\text{ K}\Omega = 7\text{ K}\Omega$$

Como el valor obtenido para R_f no es un valor comercial, se puede buscar una resistencia que tenga un valor aproximado. Esta resistencia puede ser de $6.8\text{ K}\Omega$.

Para obtener un buen acople de impedancias entre el conector y el circuito es necesario que:

$$R_p = R_{in} = 50\Omega \quad (5.7)$$

Al tener la señal de entrada con un nivel de voltaje adecuado, se procede al desarrollo de la etapa de filtrado, para lo cual se propone la implementación de un filtro pasabanda de

cuarto orden, este filtro estará conformado por dos filtros pasabanda de segundo orden en cascada, quienes a su vez contienen dos filtros cada uno, un filtro pasa bajo de segundo orden seguido de un filtro pasa alto de segundo orden.

Para la realización de este diseño se optó por la configuración de Butterworth, pues pese a no tener una excelente respuesta en las proximidades de la frecuencia de corte (f_c) cuando se implementa en ordenes bajos, su respuesta en la banda pasante es buena y no presenta rizados como en el caso de la configuración Chebyshev, además de que conserva una mejor linealidad de fase y su modelo matemático es mucho más sencillo [51].

El diseño seleccionado para la configuración Butterworth del filtro pasabanda corresponde a la topología Sallen-Key, de ganancia 1 (figura 5.6) [52].

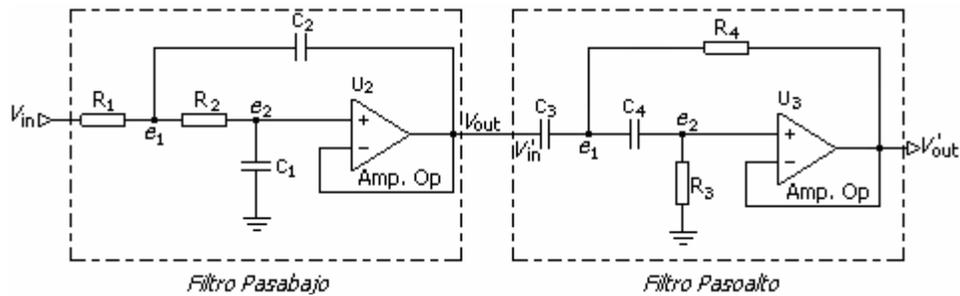


Fig. 5.6 Filtro pasabanda de 2º orden.

Según la hoja de prueba suministrada por el fabricante, el transductor opera en un rango efectivo entre 3.35 MHz y 7.04 MHz (rango para el cual la atenuación es de -6 dB); por lo tanto se fijan las frecuencias de corte en: $f_1 = 3.3$ MHz y $f_2 = 7.1$ MHz, garantizando con esto que la frecuencia central del transductor se encuentre dentro del rango, dado que este funciona con una frecuencia central de 5 MHz.

El filtro pasa bajo de la figura 5.6 es un filtro de segundo orden; por lo tanto la ecuación de transferencia en el dominio de Laplace es de la forma [52]:

$$A(s) = \frac{A_\infty}{as^2 + bs + 1} \quad (5.8)$$

Donde, $s = j\omega + \sigma$ y representa la variable de frecuencia compleja permitida para cualquier señal variable en el tiempo [52].

Para que la ecuación de transferencia (5.8) represente la configuración de Butterworth, los valores para a y b deben ser: $a = 1$ y $b = \sqrt{2}$. De modo que [53]:

$$A(s) = \frac{A_\infty}{s^2 + \sqrt{2}s + 1} \quad (5.9)$$

Para hallar la ecuación de transferencia del filtro pasa bajo conformado por el Amplificador Operacional U_2 , se aplica la ley de corrientes de Kirchhoff (LCK) al nodo e_1 y al nodo e_2 de la entrada no inversora, con lo que se obtiene las ecuaciones ^[53]:

$$\frac{V_1 - V_{in}}{R_1} + \frac{V_1 - V_{out}}{1} + \frac{V_1 - V_{out}}{R_2} = 0_2 \quad ; \quad \omega_c = 2\pi f_2 \quad (5.10)$$

y

$$\frac{V_{out} - V_1}{R_2} + \frac{V_{out}}{1} = 0 \quad (5.11)$$

Despejando V_1 de la ecuación (5.11) y reemplazándola en la ecuación (5.10), se obtiene:

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2 \omega_c^2 s^2 + \omega_c C_1 (R_1 + R_2) s + 1} \quad (5.12)$$

Esta es la ecuación de transferencia representativa del filtro pasa bajo de 2° orden, donde $A_\infty = 1$ por la configuración de seguidor de tensión. Al comparar esta ecuación con la ecuación (5.9) se tiene que:

$$a = 1 = \omega_c^2 R_1 R_2 C_1 C_2 \quad (5.13)$$

y

$$b = \sqrt{2} = \omega_c C_1 (R_1 + R_2) \quad (5.14)$$

Dados los valores de C_1 y C_2 los valores de las resistencias R_1 y R_2 se pueden obtener al despejar R_2 de las ecuaciones (5.13) y (5.14), así:

$$R_2 = \frac{a}{\omega_c^2 C_1 C_2 R_1} \quad (5.15)$$

y

$$R_2 = \frac{b}{\omega_c C_1} - R_1 \quad (5.16)$$

De donde, al igualar con respecto a R_2 se tiene:

$$R_1 = \frac{bC_2 \pm \sqrt{b^2 C_2^2 - 4aC_1 C_2}}{4\pi f_2 C_1 C_2} \quad (5.17)$$

Es importante resaltar que para obtener valores reales para R_1 y R_2 , el valor del radicando de la ecuación (5.17) debe ser ≥ 0 . Condición que se cumple cuando:

$$C_2 \geq 2C_1 \quad (5.18)$$

Por condiciones de diseño las resistencias deben ser mayores a 1 k Ω y menores de 1 M Ω . Además de que los condensadores no pueden ser menores a 2.2 picofaradios. Por tanto, se escogió $C_1 = 12 \text{ pF}$ y $C_2 = 27 \text{ pF}$, pues se debe cumplir la condición: $C_2 \geq 24 \text{ pF}$ (27 pF es el valor comercial más cercano a 24). Teniendo en cuenta estos valores procedemos a hallar R_1 de la ecuación 5.17, así:

$$R_{1\pm} = \frac{\sqrt{2} \cdot (27 \times 10^{-12}) F \pm \sqrt{2 \cdot (27 \times 10^{-12} F)^2 - 4 \cdot (12 \times 10^{-12} F) \cdot (27 \times 10^{-12} F)}}{4\pi \cdot (7.1 \times 10^6 \text{ Hz}) \cdot (12 \times 10^{-12} F) \cdot (27 \times 10^{-12} F)}$$

De donde; $R_{1+} \approx 1761.2 \Omega$ y $R_{1-} \approx 880.6 \Omega$. Al resolver la ecuación cuadrática se observa que R_1 tiene dos soluciones reales, por lo tanto se puede escoger uno de estos dos valores para hallar el valor de R_2 . Al escoger $R_1 \approx 880.6 \Omega$ y reemplazarla en la ecuación 5.15, junto a los demás valores se obtiene:

$$R_2 = \frac{a}{\omega_c^2 C_1 C_2 R_1} = \frac{1}{(2 \cdot \pi \cdot 7.1 \times 10^6 \text{ Hz})^2 \cdot 12 \times 10^{-12} F \cdot 27 \times 10^{-12} F \cdot 880.6 \Omega} \approx 1761.2 \Omega$$

Del resultado anterior se puede observar que el valor de R_2 corresponde al valor de R_{1+} , por lo tanto, estas dos resistencias pueden intercambiar sus valores.

Como los valores de R_1 y R_2 no son valores comerciales, hay que seleccionar unos valores comerciales cercanos a ellos que cumplan con las condiciones de diseño. Estos valores son: $R_1 = 1 \text{ K}\Omega$ y $R_2 = 1.8 \text{ K}\Omega$, los cuales se validan a continuación con los coeficientes a y b de la ecuación de transferencia:

$$a = 1 = \omega_c^2 R_1 R_2 C_1 C_2 = (2 \cdot \pi \cdot 7.1 \times 10^6 \text{ Hz})^2 \cdot 12 \times 10^{-12} F \cdot 27 \times 10^{-12} F \cdot 1 \text{ K}\Omega \cdot 1.8 \text{ K}\Omega \cong 1.160 \approx 1.16$$

$$b = \sqrt{2} = \omega_c C_1 (R_1 + R_2) = 2 \cdot \pi \cdot 7.1 \times 10^6 \text{ Hz} \cdot 12 \times 10^{-12} F \cdot (1 \text{ K}\Omega + 1.8 \text{ K}\Omega) \cong 1.4989 \approx 1.5$$

Así, la ecuación de transferencia en el dominio de Laplace que representa el filtro pasa bajo de 2^{do} orden en el circuito, es de la forma:

$$A(s) = \frac{1}{1.16s^2 + 1.5s + 1} \quad (5.19)$$

Para el diseño del filtro pasa alto se utiliza la propiedad de dualidad de los filtros, que permite convertir un filtro pasa bajo en un filtro pasa alto al intercambiar las resistencias con los condensadores, conservando la misma topología. En este caso la ecuación de transferencia en el dominio de Laplace para el filtro pasa alto es de la forma ^[52]:

$$A(s) = \frac{A_\infty}{\left(a \frac{1}{s^2} + b \frac{1}{s} + 1 \right)} \quad (5.20)$$

Al aplicar la ley de voltajes de Kirchoff (LVK) a los nodos e_1 y e_2 del filtro pasa alto (figura 5.6), se obtienen las ecuaciones:

$$\frac{V_1 - V_{in'}}{s\omega_c C_3} + \frac{V_1 - V_{out'}}{R_4} + \frac{V_1 - V_{out'}}{s\omega_c C_4} = 0_2 \quad ; \quad \omega_c = 2\pi f_1 \quad (5.21)$$

y

$$\frac{V_{out'} - V_1}{s\omega_c C_4} + \frac{V_{out'}}{R_3} = 0 \quad (5.22)$$

Despejando V_1 de la ecuación 5.22 y reemplazando su valor en la ecuación 5.21 se tiene:

$$\frac{V_{out'}}{V_{in'}} = \frac{1}{\left(\frac{1}{\omega_c^2 R_3 R_4 C_3 C_4} \cdot \frac{1}{s^2} + \frac{C_3 + C_4}{\omega_c R_3 C_3 C_4} \cdot \frac{1}{s} + 1 \right)} \quad (5.23)$$

Esta es la ecuación de transferencia para el filtro pasa alto de 2^{do} orden con topología Sallen-Key, donde $A_\infty = 1$ por la configuración de seguidor de tensión.

Para simplificar el diseño del circuito se hace $C_1 = C_2 = C$. Así la ecuación 5.23 toma la forma ^[53]:

$$A(s) = \frac{1}{\left(\frac{1}{\omega_c^2 R_3 R_4 C^2} \cdot \frac{1}{s^2} + \frac{2}{\omega_c R_3 C} \cdot \frac{1}{s} + 1 \right)} \quad (5.24)$$

Comparando la ecuación 5.24 con la ecuación de transferencia para el filtro pasa alto (ecuación 5.20), se obtiene que:

$$a = 1 = \frac{1}{\omega_c^2 R_3 R_4 C^2} \quad (5.25)$$

y

$$b = \sqrt{2} = \frac{2}{\omega_c R_3 C} \quad (5.26)$$

Dando un valor a C , que cumpla con las condiciones de diseño, los valores de R_3 y R_4 se pueden obtener de ^[53]:

$$R_3 = \frac{2}{b \omega_c C} \quad (5.27)$$

y

$$R_4 = \frac{1}{a \omega_c^2 R_3 C^2} = \frac{b}{2a \omega_c C} \quad (5.28)$$

Si $C = 12 \rho F$, de las ecuaciones 5.27 y 5.28 se obtiene:

$$R_3 = \frac{2}{b \omega_c C} = \frac{2}{\sqrt{2} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 3.3 \times 10^6 \text{ Hz} \cdot 12 \times 10^{-12} \text{ F}} \approx 5684 \Omega$$

y

$$R_4 = \frac{b}{2a \omega_c C} = \frac{\sqrt{2}}{2 \cdot 1 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 3.3 \times 10^6 \text{ Hz} \cdot 12 \times 10^{-12} \text{ F}} \approx 2842 \Omega$$

Los valores obtenidos para R_3 y R_4 , no son valores comerciales, por lo tanto hay que seleccionar unos valores comerciales cercanos a ellos; estos valores son: $R_3 = 5.6K\Omega$ y $R_4 = 3K\Omega$. Al validar dichos valores con los coeficientes a y b de la ecuación de transferencia se tiene:

$$a = 1 = \frac{1}{\omega_c^2 R_3 R_4 C^2} = \frac{1}{(2 \cdot \pi \cdot 3.3 \times 10^6 \text{ Hz})^2 \cdot 5600 \Omega \cdot 3000 \Omega \cdot (12 \times 10^{-12} \text{ F})^2} \approx 1.054$$

$$b = \sqrt{2} = \frac{2}{\omega_c R_3 C} = \frac{2}{2 \cdot \pi \cdot 3.3 \times 10^6 \text{ Hz} \cdot 5600 \Omega \cdot 12 \times 10^{-12} \text{ F}} \approx 1.4354$$

Por lo tanto, la ecuación de transferencia en el dominio de Laplace que representa el filtro pasa alto de 2^{do} orden, es de la forma:

$$A(s) = \frac{1}{\left(1.054 \frac{1}{s^2} + 1.4354 \frac{1}{s} + 1\right)} \quad (5.29)$$

Este fue el análisis para uno de los filtros pasabanda en cascada de 2^{do} orden que conforman la etapa de filtrado. Sin embargo, dado que los filtros son de idéntica configuración y topología, los valores de las resistencias y de los condensadores del otro filtro pasabanda serán iguales a los que se obtuvieron en este análisis. El circuito completo de la etapa de filtrado se observa en la siguiente figura:

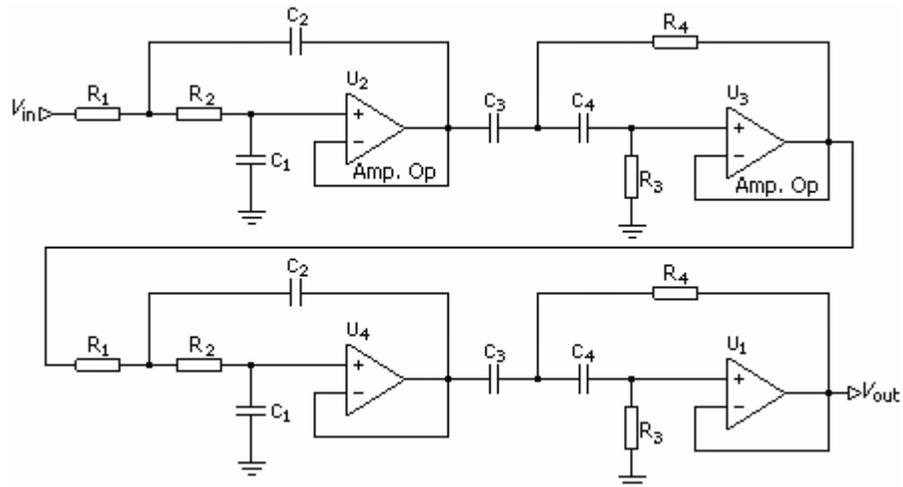


Fig. 5.7 Circuito del filtro pasa banda de 4^{to} orden.

La señal que se obtiene de la etapa de filtrado conserva el mismo nivel de voltaje con el que entró al filtro, dado que la topología utilizada tiene ganancia unitaria. Por tanto, se hace necesario la implementación de otra etapa de amplificación, con la cual se elevará el nivel de la señal al rango de trabajo del convertor A/D, que se implementara más adelante. Para el convertor A/D se ha establecido como voltaje de entrada analógica un rango entre [0V, 4V]. Dicho nivel de señal se puede lograr con amplificadores operacionales si se utiliza una fuente dual de por lo menos 5 voltios. Los A-O se deben acompañar de un divisor de voltaje que permita subir el nivel de la señal al rango positivo.

La configuración a utilizar en esta etapa corresponde a un amplificador de baja señal (figura 5.8), el cual esta compuesto por un amplificador operacional en configuración no inversora que se obtiene del circuito integrado LM837 seguido un divisor de voltaje que permite subir la señal a un nivel DC de 2.5 V y de un seguidor de tensión que sirve como desacople de cargas, y que en conjunto se encargan de elevar la señal al rango de trabajo del convertor A/D.

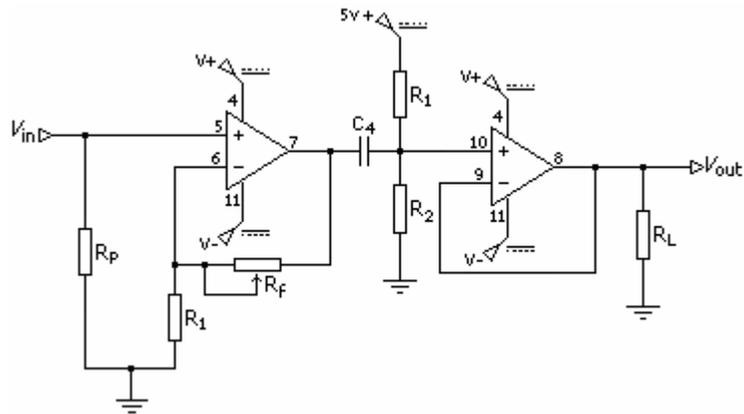


Fig. 5.8 Circuito amplificador de pequeña señal.

Bajo esas consideraciones, se retoma la ecuación 5.6 y se obtiene:

$$A_v = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{4V_{pp}}{1.6V_{pp}} = 2.5V/V$$

Si $R_1 = 5.6K\Omega$, se procede a hallar el valor de R_f de la ecuación 5.5 de la siguiente forma:

$$A_v = 1 + \frac{R_f}{5.6K\Omega} = 2.5$$

De donde:

$$R_f = 1.5 \cdot 5.6K\Omega = 8.4K\Omega$$

Para permitir el ajuste de la ganancia se recomienda que R_f sea una resistencia variable, por lo que en el diseño se considera el uso de un potenciómetro multivuelta (trimmer) de 10 K Ω .

La resistencia R_p se determina como una resistencia de compensación a través de la ecuación:

$$R_p = R_f \parallel R_1 = \frac{R_f R_1}{R_f + R_1} \quad (5.30)$$

De donde;

$$R_p = \frac{8.4K\Omega \cdot 5.6K\Omega}{8.4K\Omega + 5.6K\Omega} = 3.36K\Omega \approx 3.3K\Omega$$

Entre el amplificador de baja señal y el divisor de voltaje se coloca un condensador de paso de 1 nF, para desacoplar la señal de salida que entrega el filtro pasabanda.

Para subir el nivel de la señal que entrega el amplificador, se utiliza un divisor de voltaje conformado por una fuente V_{CC} de 5 V, una resistencia $R_1 = 10K\Omega$ y una resistencia $R_2 = 10K\Omega$. Así el nivel DC que recibe la señal será igual al voltaje que cae en la resistencia R_2 . Este voltaje se obtiene a través de la ecuación:

$$\begin{aligned} V_{R_2} &= \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{CC} \\ &= \frac{10K\Omega}{20K\Omega} (5V) \approx 2.5V \end{aligned} \quad (5.31)$$

El circuito completo de esta etapa se puede observar en el Anexo - J.

5.2.3 Diseño de la etapa de conversión A/D y envío al PC.

En esta etapa se toma la señal analógica que entrega el filtro pasabanda para convertirla al formato digital mediante un conversor A/D y llevarla posteriormente al computador a través del puerto serial. Dado que el puerto serial no esta en capacidad de transmitir la señal con la misma velocidad con que la entrega el conversor A/D, se requiere la implementación de un buffer de almacenamiento temporal que permita guardar la señal mientras el puerto la transmite al PC. Este buffer de almacenamiento temporal requiere de un sistema de control y hace que el sistema no funcione en tiempo real. El diagrama esquemático de esta etapa se observa en la figura 5.9.



Fig. 5.9 Diagrama esquemático de la etapa de conversión A/D y envío de la señal al PC.

Para la implementación de esta etapa se requiere la utilización de 6 tipos de Circuitos Integrados (CI) quienes en conjunto facilitaran la tarea de convertir la señal al formato digital y posteriormente llevarla al PC. Estos CI son:

- ☆ Un PIC18F452 de Microchip: es el dispositivo de control del Analizador Ultrasónico, que cuenta con las siguientes características especiales ^[54]:
 - ✗ Velocidad de operación de hasta 10 MIPS con reloj externo de 40 MHz o de 4 MHz a 10 MHz con PLL activo.
 - ✗ 16384 palabras de instrucción.
 - ✗ 1536 bytes para RAM.
 - ✗ 256 bytes de EEPROM.
 - ✗ Temporizadores / Contadores.
 - ✗ Conversor A/D de 10 bits.

✘ USART soporta RS-232.

La frecuencia de operación del oscilador general es de 20 MHz, para lo cual el PIC opera con una frecuencia interna de 5 MIPS en el modo HS.

- ☆ Un conversor A/D HI1175 (SOIC) de Intersil: este dispositivo es el encargado de recibir la señal que viene de la etapa de adecuación. Como la señal que se recibe es una señal de radiofrecuencia filtrada para una frecuencia central de 5 MHz, el conversor A/D debe operar al menos a una velocidad de 10 millones de muestras por segundo como lo sugiere el teorema de Nyquist, a fin de evitar imprecisión en la amplitud y la aparición de subarmónicos. Esta es la razón por la que se sugiere el uso del HI1175, ya que puede operar a una velocidad de 20 MSPS utilizando tecnología flash. No se hace uso del CAD que tiene incorporado el PIC por la velocidad con que este opera, pues de las especificaciones se sabe que la velocidad de operación del PIC es de 10 MIPS, con la cual, apenas si se cumple lo requerido por el teorema de Nyquist. Lo que hace suponer que se den imprecisiones en la amplitud y la aparición de subarmónicos ^[55].
- ☆ Una memoria RAM externa KM62256C (CMOS) de 32 KB: este CI es el encargado de almacenar temporalmente los datos que entrega el conversor A/D, para que luego sean llevados al PC con la velocidad que soporta su puerto COM. A pesar de que el PIC tiene empotrada una RAM, no se hizo uso de ella por dos razones: la primera porque la velocidad con que entrega los datos el CAD es mucho mayor que la velocidad de operación del PIC y la segunda porque su capacidad de almacenamiento es inferior a la requerida, pues el tamaño que se propone para el buffer de almacenamiento es de 10 Kb (aproximadamente).
- ☆ 5 contadores 74HC/HCT161 (Philips Semiconductors): son los encargados de suministrar las direcciones de escritura de la RAM.
- ☆ 5 multiplexores 74HC/HCT257 (Philips Semiconductors): estos dispositivos son los que permiten el direccionamiento de la memoria: en escritura por los contadores y en lectura por el PIC.
- ☆ Un MAX 232: este CI cambia los niveles TTL a los del estandar RS-232 cuando se hace una transmisión al PC y cambia los niveles RS-232 a TTL, cuando se tiene una recepción desde el PC.

El proceso de control que ejerce el PIC sobre cada uno de los integrados se resume de la siguiente manera:

- 1º Deshabilita todo el circuito relacionado con él y clarea los contadores.
- 2º Habilita contadores, compuerta AND, multiplexores, memoria, y conversor A/D. Pasa la señal de 5 MHz a la compuerta AND del generador del tren de pulsos.

En el ciclo positivo del reloj se genera una muestra y en el ciclo negativo se almacena en la memoria, en la dirección proporcionada por los contadores.

- 3° Se deshabilita la compuerta AND
Inicia el conteo de 500 μ s un contador interno o TIMER del PIC.
- 4° Con la interrupción del TIMER, se deshabilitan los contadores y se clarean.
Se deshabilita el conversor A/D y se habilitan los multiplexores para transmitir a la memoria las direcciones de lectura del PIC.
La memoria es habilitada en lectura.
Las direcciones de lectura son enviadas por los puertos C y D del PIC y se reciben los datos por el puerto D.
Se configura el puerto serial en transmisión y se envían los datos almacenados en la memoria.
- 5° Se configura el puerto serial en recepción a la espera del dato de configuración.

El programa en pseudocódigo que permite que el PIC 18F452 realice este proceso se encuentra en el Anexo - K. No obstante a continuación se describen algunos de los pasos más importantes.

Configuración de puertos

Para que el PIC pueda controlar tanto la adquisición de los datos en la memoria externa, como la transmisión de los mismos al PC, los puertos involucrados en este proceso se configuran de la siguiente manera:

Puerto A (6 bits): Control general.

RA0: Habilitador de contadores.

RA1: Generador del tren de pulsos (ráfagas de tonos).

Puerto B (8 bits): Entrada de datos a la memoria externa.

Puerto C (7 bits):

RC0 – RC5: Parte alta de la palabra de dirección de la memoria externa.

RC6: Transmisor del puerto serial.

RC7: Receptor del puerto serial.

Puerto D (8 bits): Parte baja de la palabra de dirección de la memoria externa.

Puerto E (3 bits): Control de acceso a memoria.

RE0: Habilitador de lectura. Controla el acceso a memoria.

RE1: Habilitador de escritura. Controla la multiplexación de direcciones y la salida del conversor A/D.

RE2: Habilitador de chips. Activa la memoria externa y los multiplexores.

Conversión A/D y almacenamiento de la señal

El convertor A/D opera con la frecuencia de reloj de 20 MHz proveniente del oscilador del PIC. Esta misma señal de reloj se envía al conjunto de contadores que generan direcciones consecutivas con el flanco de subida, para manejar la memoria RAM. La escritura en la memoria se habilita con el semiciclo bajo de la señal de reloj y captura los datos que en ese momento se encuentran en la salida del convertor. Este proceso se observa en la figura 5.10 (el circuito completo se encuentra en el Anexo – L).

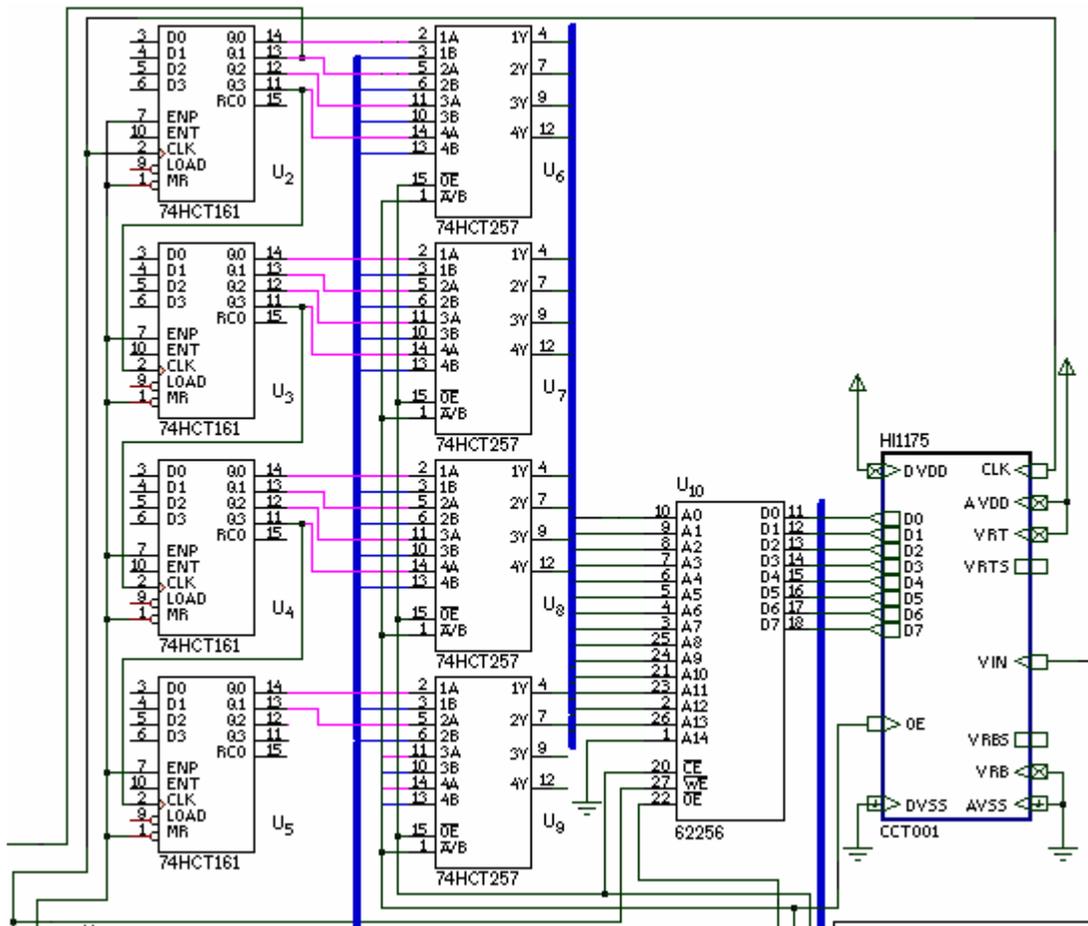


Fig. 5.10 Etapa de almacenamiento de datos.

Entre los contadores y memoria RAM se encuentra la etapa de multiplexores que permiten a los contadores direccionar la memoria en escritura y al PIC direccionarla en lectura.

Bit 1: TRMT
 Bit 0: Tx9D Paridad //Se usa paridad par

☆ **Configuración del registro RXSTA:**

Bit 7: SPEN 1 //Puerto habilitado como serial
 Bit 6: RX9 1 //Recepción de 9 bits
 Bit 5: SREN No importa
 Bit 4: CREN 1 //Habilita la recepción
 Bit 3: ADDEN 0 //Detecta el bit 9 como paridad
 Bit 2: FERR //Bit de error de trama
 Bit 1: OERR //Bit de error
 Bit 0: RX9D Paridad //Se usa paridad par

☆ **Configuración del registro SPBRG:** El registro SPBRG del generador de baudios se configura utilizando la ecuación:

$$Baudios = \frac{F_{oscilador}}{16(X+1)} \quad (5.32)$$

donde;

X \equiv es el valor de configuración del registro.

$F_{oscilador}$ \equiv es la frecuencia del cristal (20 MHz).

$Baudios$ \equiv es la velocidad de transmisión o de recepción.

Despejando X de la ecuación (5.32) se obtiene:

$$X = \frac{F_{oscilador}}{16 \cdot Baudios} - 1 \quad (5.33)$$

Así, para una velocidad de 57600 *baudios* \equiv 57600 Hz se tiene que:

$$X = \frac{20 \times 10^6 \text{ Hz}}{16 \times 57600 \text{ Hz}} - 1 = 20,7 \cong 21$$

Luego la velocidad calculada es:

$$Baudios = \frac{F_{oscilador}}{16(X+1)} = \frac{20 \times 10^6 \text{ Hz}}{16 \times 22} \approx 56818,2 \text{ Hz}$$

Por tanto, el error entre la velocidad calculada y la velocidad deseada es del:

$$E = \left| \frac{\text{Velocidad Calculada} - \text{Velocidad Deseada}}{\text{Velocidad Deseada}} \times 100 \right| \quad (5.34)$$

$$= \left| \frac{56818,18 - 57600}{57600} \times 100 \right| \approx 1,36\%$$

Para una velocidad de 115200 baudios se tiene que: $X \approx 10$ y $Baudios \approx 113636,4$; luego el error es de $E \approx 1,36\%$. De igual forma se hace para una velocidad de 128000 baudios, donde $X \approx 9$ y $Baudios \approx 125000$; así el error es de $E \approx 2,34\%$.

Las velocidades que menor error generan son (57600 y 115200) baudios. Por tanto, al aplicar la condición de diseño, la velocidad que permite hacer una mejor transferencia hacia el PC de las muestras almacenadas en la RAM en el menor tiempo posible es la velocidad de 115200 baudios con un valor de configuración de $X = 10$. Esta velocidad es soportada por el circuito de interfaz MAX232.

El tiempo de transferencia de los datos almacenados en la RAM externa (~10000 muestras de 8 bits) y el PC, se puede calcular por medio de la relación:

$$Tiempo = \frac{(8 \text{ bits de datos} + 1 \text{ bit de paridad} + 1 \text{ bit de inicio}) \cdot (\text{Tamaño de la RAM})}{\text{baudios}} \quad (5.35)$$

$$Tiempo = \frac{10 \cdot 10000b}{113636,36 \frac{b}{s}} = 0,88s \approx 1 \text{ segundo}$$

Por tanto, el tiempo empleado para hacer la transferencia de las muestras almacenadas en la RAM al PC es aproximadamente 1 s, este tiempo no afecta en nada la calidad del análisis que se pretende hacer con el analizador.

El circuito propuesto anteriormente obedece a una solución con prestaciones medias, pensando en costos de implementación mínimos y en la disponibilidad de los componentes. Sin embargo tiene como inconvenientes la cantidad de integrados requeridos, el número de conexiones entre ellos y el gran montaje que esto implica. Por tal razón en el Anexo - M se propone una solución alterna mediante la utilización del ADSP 21992 de Analog Device.

5.2.4 Procesamiento Digital de la Señal (PDS).

El Procesamiento Digital de la Señal es el procedimiento que se realiza a través de un software determinado para obtener la mayor, y mejor información posible de la señal ultrasónica que esta siendo transmitida del exterior al puerto serial del PC. Para la implementación de esta etapa se utiliza el programa Labview 7.0, el cual permite:

☆ Configurar el puerto serial.

- ☆ Almacenar la información.
- ☆ Enviar el dato de confirmación al PIC
- ☆ Aplicar las técnicas requeridas para el procesamiento digital de la señal.
- ☆ Crear una interfaz de usuario que sea comprensible y fácil de manejar.

Todos estos requerimientos se desarrollan en un solo instrumento virtual denominado “PDS y Visualizacion.vi” a excepción de la variable global “Entrada” que se utiliza como memoria de almacenamiento temporal y es un subVI que se llama durante la ejecución del VI principal.

La configuración del VI (PDS y Visualizacion.vi) consta de una sencilla estructura secuencial, para la cual se utiliza la estructura básica **sequence**. Dentro de esta estructura se realizan: el almacenamiento de la información, el envío del dato de confirmación al PIC y el Procesamiento digital de la señal ultrasónica.

Los dos primeros procesos están estrechamente relacionados con el puerto serial, el cual se debe configurar por fuera de la estructura **sequence** (figura 5.12). Para la configuración del puerto serial se tienen en cuenta los siguientes ítems:

- ☆ Una string de I/O (Puerto serial) que solamente identifica el recurso que debe ser abierto, leído y escrito.
- ☆ Velocidad de trasmisión de datos definida en la etapa anterior (115200 baudios/seg).
- ☆ Numero de bits (8).
- ☆ Un bit de parada.
- ☆ Ningun bit de paridad.

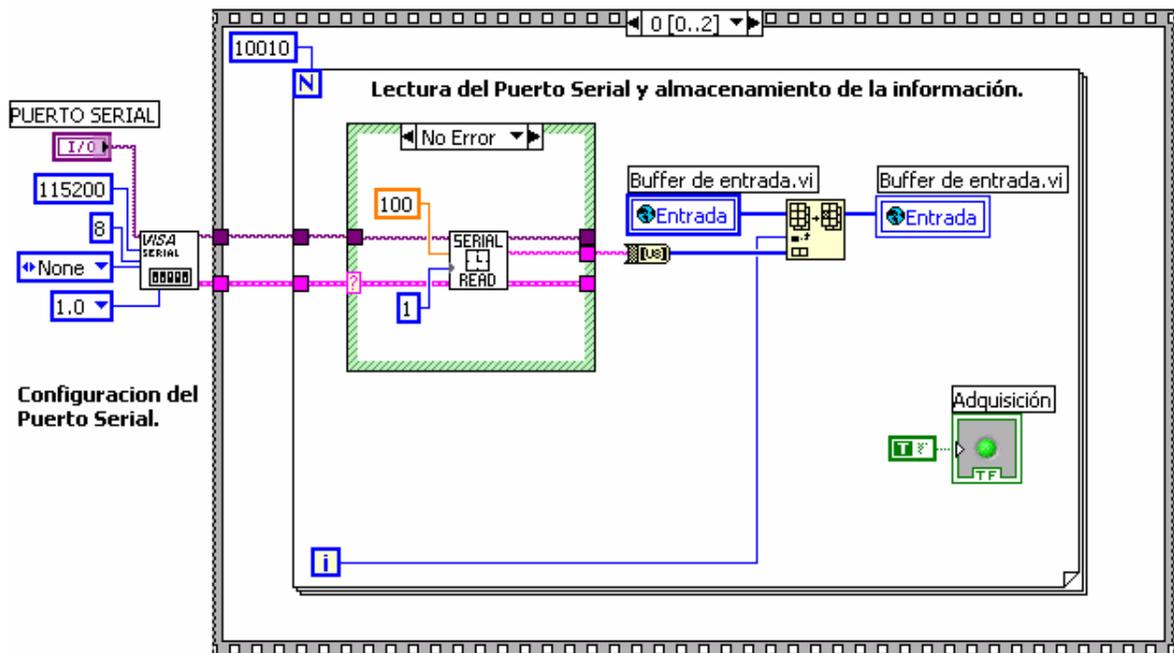


Fig. 5.12 Configuración del puerto serial, lectura del puerto y almacenamiento de la información.

En la secuencia 0 (figura anterior), se observa el proceso de lectura del puerto serial previamente configurado. La lectura del puerto serial se implementa a través de una estructura **Case**, que al leer el puerto serial ejecuta el estado de No Error y cuando deja de leer el puerto serial ejecuta el estado de Error y envía un cero. La señal que se lee en el puerto serial se almacena en la variable global “Entrada” a través de la herramienta **Replace Array Subset** que se encarga de tomar la variable global y direccionarla mediante la estructura **For Loop** para reemplazar/almacenar la información en dicha variable.

En la secuencia 1 (figura 5.13), se envía el dato de confirmación al PIC a través del puerto serial mediante la opción de escritura que se habilita con la estructura **Case**, es su estado de No Error.

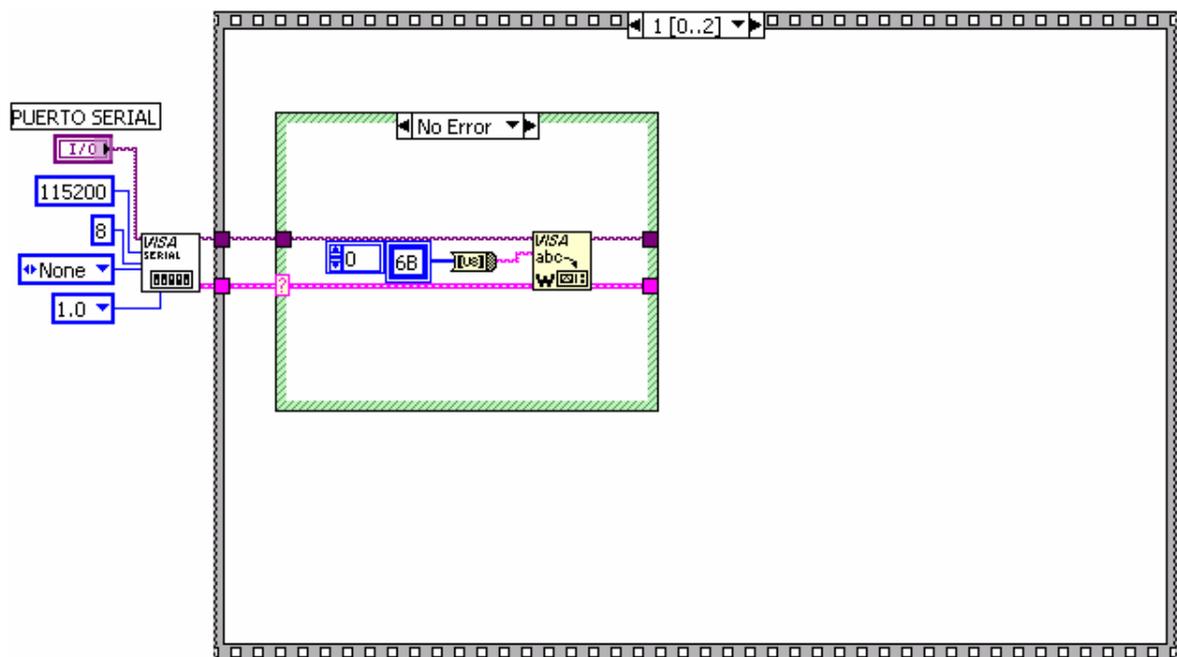


Fig. 5.13 *Envío del dato de confirmación al PIC a través del Puerto Serial.*

Por ultimo en la secuencia 2 (figura 5.14), se desarrolla el Procesamiento Digital de la señal ultrasónica que ha sido almacenada previamente en la variable local.

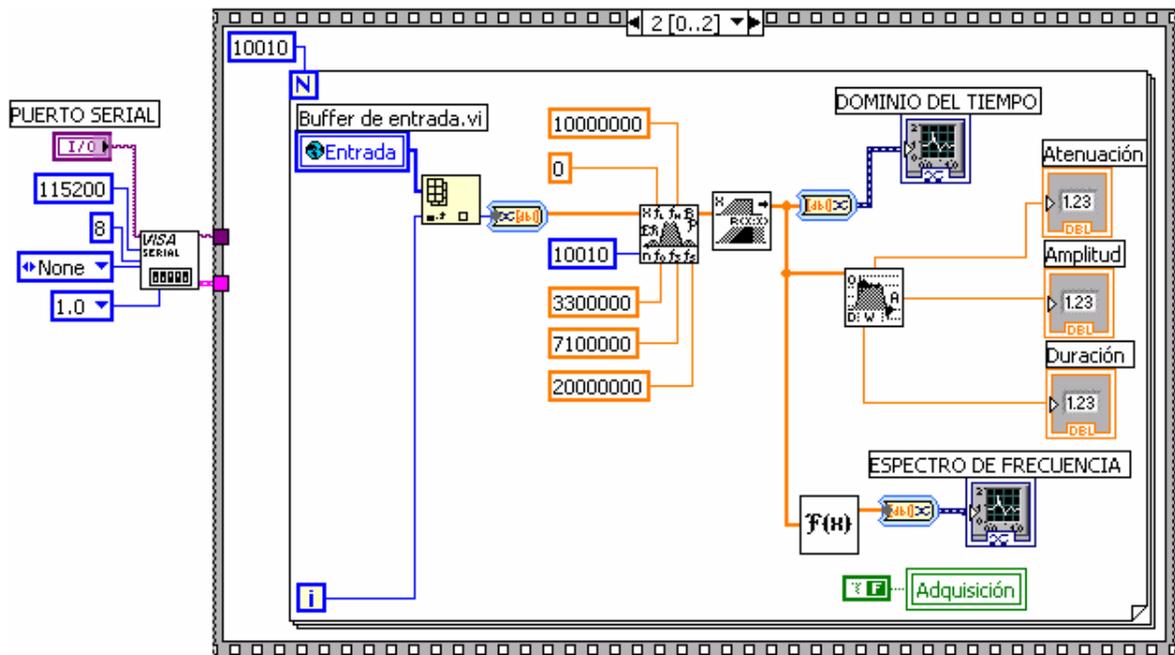


Fig. 5.14 *Procesamiento Digital de la Señal Ultrasónica.*

El PDS es un conjunto de operaciones o procesos que se pueden realizar sobre la señal muestreada. Estas operaciones se realizan con el fin de mejorar la información contenida en la señal a fin de obtener una imagen nítida, fácil de interpretar. Para el Procesamiento de la señal ultrasónica se tomaron las siguientes operaciones:

- ☆ **Filtro antialiasing:** Es en esencia un filtro pasabanda con las mismas frecuencias de corte del filtro analógico propuesto en el diseño circuital, y tiene como finalidad fundamental eliminar todos los subarmónicos o “aliasing” con frecuencias inferiores o superiores a las frecuencias de corte en la señal de entrada ^[46].
- ☆ **Autocorrelación:** es la correlación que se realiza de la señal ultrasónica en el dominio del tiempo con ella misma. Esta técnica se utiliza para reducir el nivel de ruido que este contaminando la señal ^[46].
- ☆ **Transformada rápida de Fourier (FFT):** Esta técnica consiste en transformar la señal ultrasónica del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia. Con el fin de conocer algunas características del transductor como: la frecuencia central, el ancho de banda el factor de amortiguamiento, además del rango de frecuencias en que se encuentra la energía del pulso o la frecuencia de un ruido para deducir su procedencia ^[46].

5.2.5 Visualización o interfaz grafica.

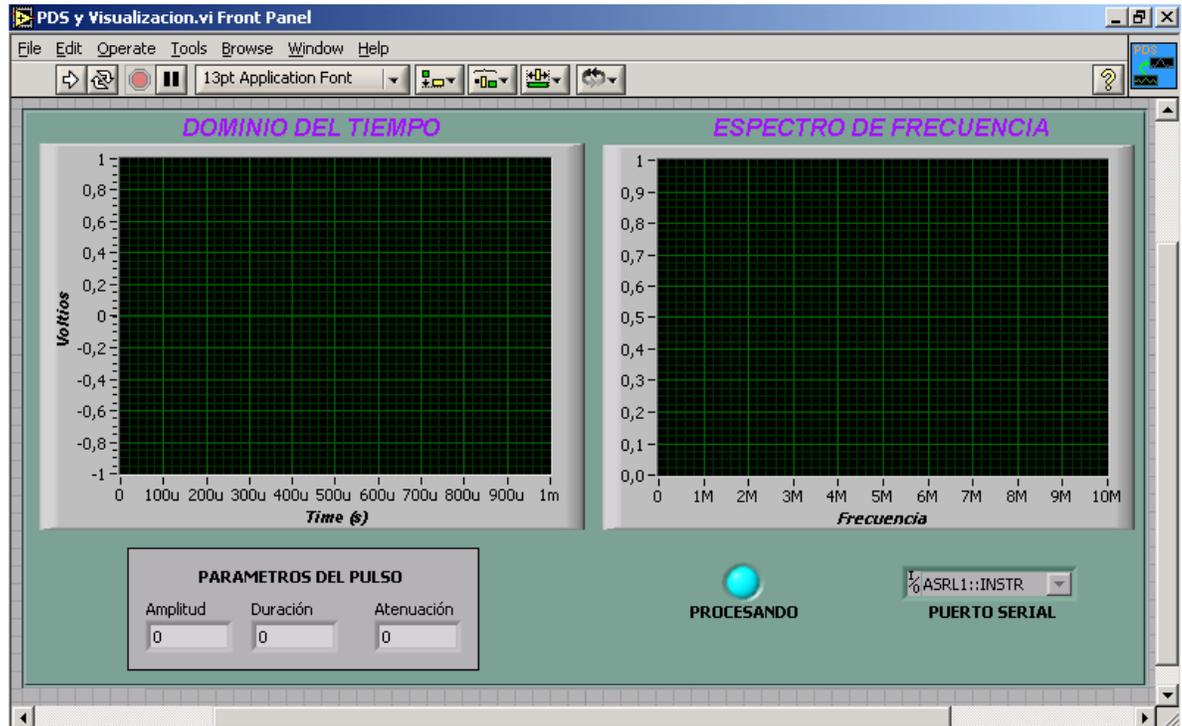


Fig. 5.15 Interfaz gráfica.

La forma como se presenta la información al usuario es consecuencia lógica de la etapa Procesamiento Digital de la Señal, pues se va a tener un despliegue de la señal en el dominio del tiempo y un despliegue de la señal en el dominio de la frecuencia, además de obtener los parámetros más relevantes del pulso de la señal en el dominio del tiempo (figura 5.15).

Además de las herramientas de visualización mencionadas arriba, se tiene la ayuda de un led que me permite saber cuando se esta adquiriendo la información o cuando se esta procesando y un string que permite determinar el puerto COM del PC a través del cual se hace la comunicación con el sistema analógico.

5.3 RESULTADOS QUE SE ESPERAN OBTENER Y ANÁLISIS DE LOS MISMOS.

El diseño del analizador ultrasónico busca que al ser implementado, el dispositivo esté en capacidad de detectar defectos puntuales y de línea.

Para la detección de defectos puntuales y de línea con orientación paralela a la superficie de la muestra a través de la cual se realiza el análisis del material, se recomienda utilizar el transductor de contacto directo (A107S). Este transductor posee una longitud de onda o

longitud del tren de pulsos que depende de la velocidad de la onda longitudinal en el material de prueba, y se puede obtener a través de la relación:

$$\lambda_{pulso} = \frac{C_L}{f_{pulso}} \quad (5.36)$$

donde,

- λ_{pulso} \equiv longitud del tren de pulsos.
- C_L \equiv velocidad longitudinal en el material de prueba.
- f_{pulso} \equiv frecuencia del tren de pulsos (1 MHz Aproximadamente).

El defecto mínimo que se puede detectar por el analizador ultrasónico esta relacionado con la longitud del tren de pulsos como se observa en la ecuación ^[18]:

$$Def_{min} = \frac{\lambda_{pulso}}{2} \quad (5.37)$$

Así, para una muestra de acero 1020, la longitud del tren de pulsos es de 5,89 mm y el tamaño del defecto mínimo que se puede detectar en una estructura o pieza de este material es de 2,9 mm (aproximadamente).

Si el defecto que se desea detectar es una grieta perpendicular a la superficie de la muestra sobre la cual descansa el transductor, se requiere la utilización del palpador de haz angular (A409S). Para el cual se pueden calcular: las longitudes del tren de pulsos que se esperan obtener en cada uno de los materiales listados en el Anexo - A y el tamaño mínimo que debe tener un defecto para ser detectado. Todo esto de igual forma como se hizo con el palpador de contacto directo, sin olvidar que para este análisis se debe tener en cuenta la velocidad de las ondas transversales en cada uno de los materiales (Tabla 5.1).

Con el Analizador Ultrasónico se desea detectar los defectos que pueda tener una estructura en su interior a través de la técnica de visualización SCAN A, la cual muestra la señal que ha recorrido el material. Esta señal en el dominio del tiempo permite:

- ☆ Visualizar el eco de la parte posterior del material y adicionalmente el eco del defecto, si éste existe.
- ☆ Como la señal es registrada sobre una base de tiempo sincronizada, se puede calcular la profundidad del defecto y el espesor del material de prueba mediante la utilización de la relación 5.36 ó tiempo de vuelo que utiliza la señal en recorrer el material.

$$t_v = \frac{2D}{C} \quad (5.38)$$

Donde D es la distancia del defecto al transductor o el espesor del material y C es la velocidad de la onda acústica en dicho material.

- ☆ El tamaño del defecto se puede considerar de la cantidad del haz que se refleja en la superficie del mismo. Relacionando la intensidad reflejada con el tamaño del eco registrado.

Material	Transductor			
	A107S - RB		A409S - RB	
	λ_{pulso} (mm)	Def_{min} (mm)	λ_{pulso} (mm)	Def_{min} (mm)
Aluminio	6,32	3,160	3,13	1,565
Latón, naval	4,43	2,215	2,12	1,060
Cobre	4,66	2,330	2,26	1,130
Oro	3,24	1,620	1,20	0,600
Hierro	5,90	2,950	3,23	1,615
Hierro, (fundido lento)	3,50	1,750	2,20	1,100
Hierro, (fundido rápido)	5,60	2,800	3,22	1,610
Plomo	2,16	1,080	0,70	0,350
Manganeso	4,66	2,330	2,35	1,175
Níquel, puro	5,63	2,815	2,96	1,480
Platino	3,96	1,980	1,67	0,835
Plata	3,60	1,800	1,59	0,795
Acero, 1020	5,89	2,945	3,24	1,620
Acero, 4340	5,85	2,925	3,24	1,620
Acero, 302	5,66	2,830	3,12	1,560
Acero austenítico inoxidable, 347	5,74	2,870	3,09	1,545
Estaño austenítico inoxidable	3,32	1,660	1,67	0,835
Tungsteno	5,18	2,590	2,87	1,435
Zinc	4,17	2,085	2,41	1,250

Tabla 5.1 Longitudes del tren de pulsos y defectos mínimos para cada uno de los transductores.

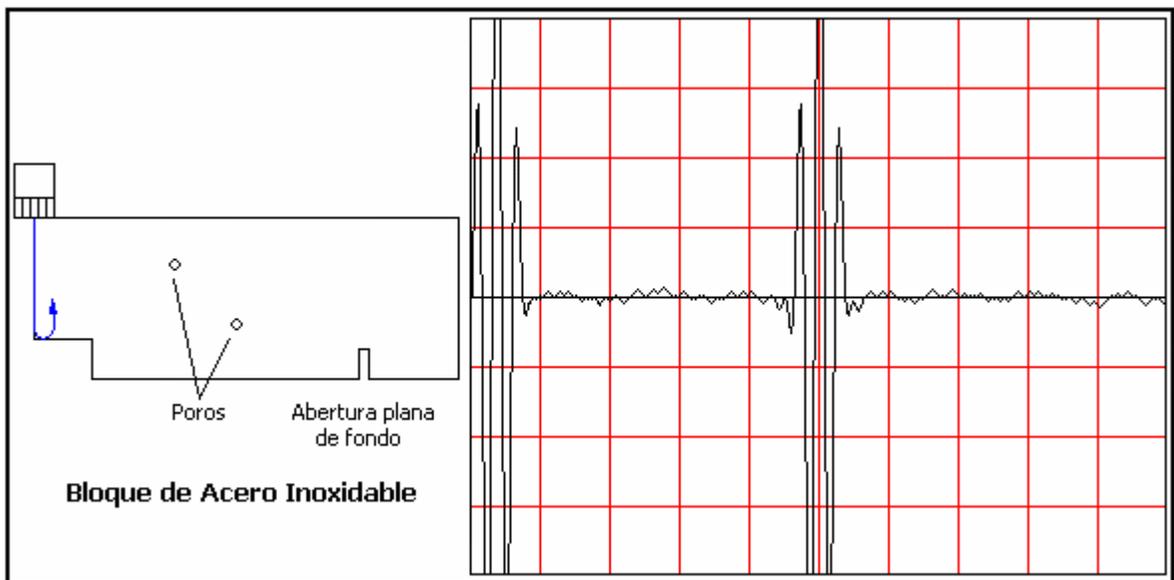
Las siguientes figuras permiten observar el proceso que se realiza a través del barrido de un bloque de acero inoxidable con un transductor de contacto directo.

En la figura 5.16 (a) se observa la señal de respuesta en el dominio del tiempo. Esta señal se halla sincronizada con el primer eco que se obtiene del bloque de acero, el cual corresponde a la reflexión que se produce en la interfaz del bloque. También se visualiza otra reflexión aproximadamente igual a la anterior, la cual viene de la parte posterior del bloque.

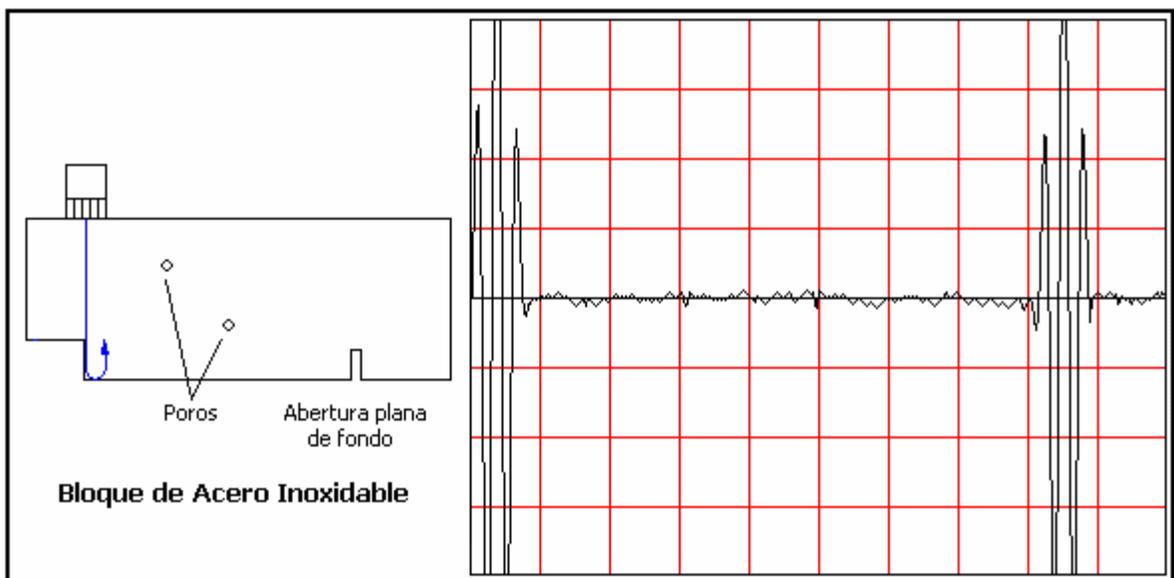
En la figura 5.16 (b) se observa además de la señal de entrada que permite la sincronización de la base de tiempos, otra señal similar pero más corrida a la derecha que la señal que se visualiza en la figura 5.16 (a). Esta señal es la reflexión que sufre el haz en la pared posterior real del bloque, pues este desplazamiento en tiempo indica que el bloque analizado tiene un escalón.

Pasando a la figura 5.16 (c), se observa un pequeño eco entre las señales recibidas de la interfaz y, de la pared posterior del bloque. Este eco indica la presencia de un defecto, el cual esta muy cercano a la superficie de análisis del bloque, ya que se registro muy cerca de la señal de entrada.

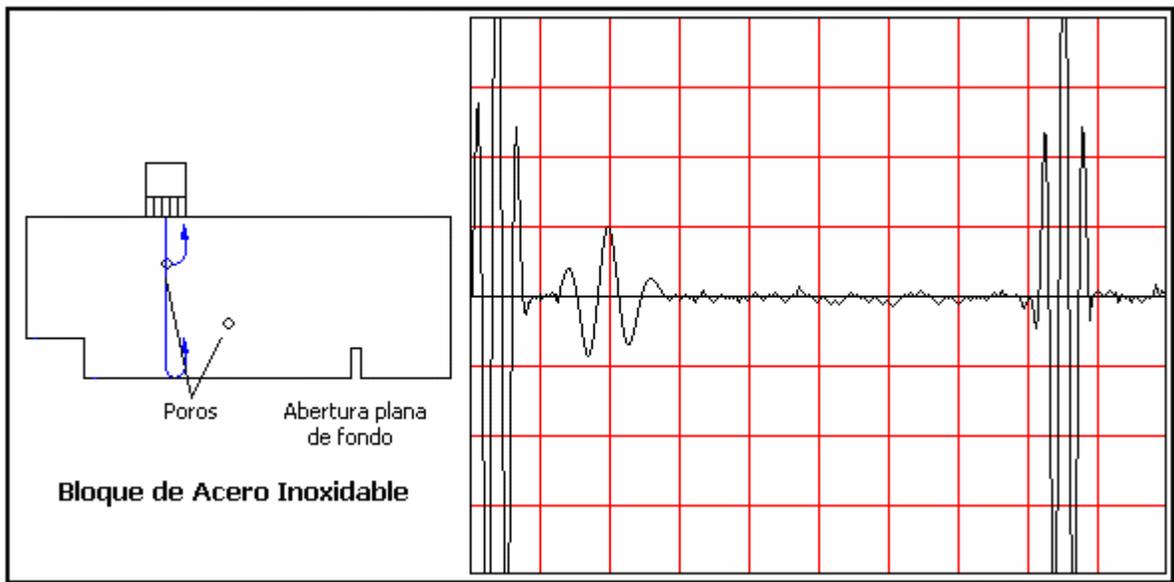
La figura 5.16 (d), muestra la presencia de otro defecto el cual se localiza cerca de la pared posterior del bloque, y por el tamaño de la señal se deduce que el tamaño del defecto es mayor al observado en la figura 5.16 (c), dado que este se halla mas alejado del transductor y su señal indica que la cantidad de haz reflejado es mayor.



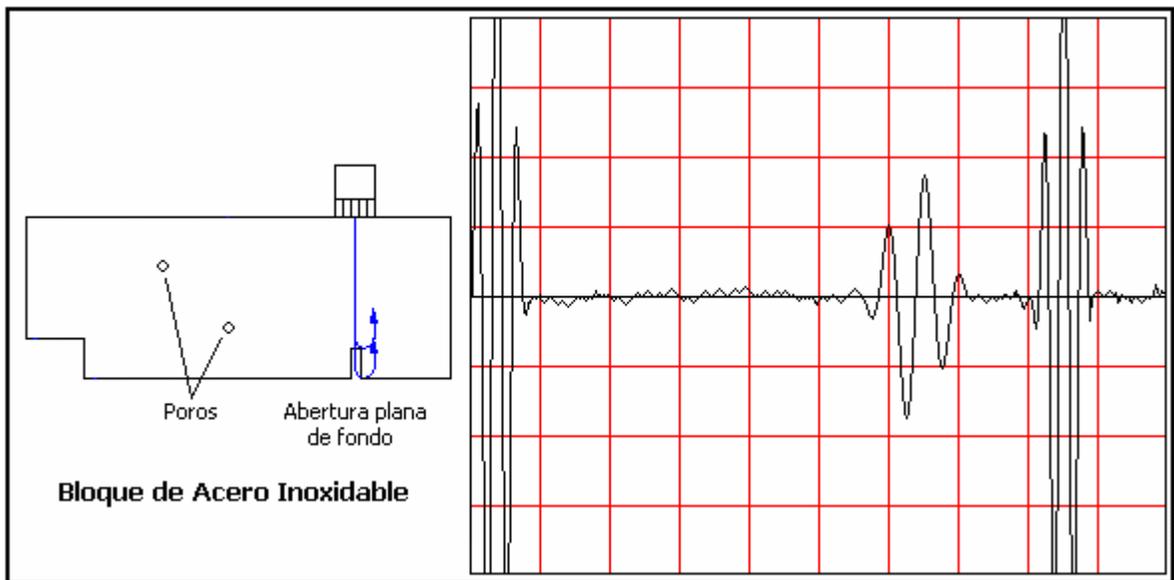
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 5.16 Barrido de un bloque de acero inoxidable con un transductor de contacto directo (a) señal de entrada y señal del escalón que contiene el bloque de acero. (b) señal de entrada y señal de la pared posterior del bloque. (c) eco de un defecto cercano al transductor. y (d) eco de un defecto cuya superficie de reflexión es mayor que la superficie del defecto observado en la figura anterior, y el cual se halla ubicado cerca de la pared posterior del bloque de acero.

6. CONCLUSIONES

Al culminar y evaluar el Proyecto “Diseño de un Analizador Ultrasónico” se concluye que:

- ☆ Se aplicaron los conocimientos adquiridos en el programa de Ingeniería Física, especialmente los relacionados con el área de Instrumentación y Control. Además de profundizar y adquirir nuevos conocimientos de la mecánica ondulatoria en lo relacionado con el comportamiento de las ondas acústicas (ultrasonido).
- ☆ Se diseñó un analizador ultrasónico de prestaciones medias de tal forma que sea posible la consecución de los dispositivos electrónicos necesarios, los cuales cumplen con las exigencias para el tratamiento de señales de alta frecuencia.
- ☆ Con el diseño del Analizador Ultrasónico se demuestra que el Ingeniero Físico está en capacidad de plantear modelos tecnológicos que permitan satisfacer las necesidades industriales del entorno a un costo más bajo. Además de ampliar el conocimiento y apropiarse de la tecnología involucrada.
- ☆ Con el diseño del Analizador Ultrasónico se crean las bases para futuros desarrollos en el área del ultrasonido, ya sea dentro del programa de Ingeniería Física o en programas afines.
- ☆ El desarrollo de este proyecto permite visualizar la importancia en la implementación de las técnicas de evaluación no destructiva en el ámbito industrial, especialmente en la manufactura de dispositivos metálicos, en el mantenimiento preventivo de los mismos durante el tiempo de vida útil y en la preservación de la integridad tanto de los materiales objeto de análisis, como de los operarios responsables de la aplicación de las pruebas.
- ☆ La técnica de evaluación no destructiva a base de ultrasonido analizada en este proyecto, se puede aplicar a campos definidos de la industria relacionados con el área metalúrgica, ya que permite evaluar las grandes estructuras metálicas que a diario se utilizan en la construcción de puentes y edificaciones. También permite hacer una aproximación al ultrasonido que se utiliza en el campo médico, ya que el principio físico utilizado es el mismo; sin embargo, es imperante tener unos conocimientos básicos de fisiología a fin de hacer el tratamiento adecuado de la señal según los requerimientos y exigencias que la análisis del cuerpo humano requiere.

7. FUTUROS DESARROLLOS

Con el diseño del Analizador Ultrasónico, se abre la posibilidad de que a futuro se planteen nuevos proyectos tendientes a materializar este diseño y mejorar sus características, ya que el diseño propuesto es un diseño de prestaciones medias que puede ser mejorado a través de la utilización de dispositivos capaces de suplir todos los requerimientos de la señal de ultrasonido de 5 MHz.

El dispositivo más recomendado para la implementación del Analizador Ultrasónico es Procesador Digital de Señal (DSP) con una frecuencia de trabajo igual o superior a 50 MIPS, el cual permite hacer el tratamiento de la señal sin ningún tipo de restricción debida a la frecuencia, además de minimizar la complejidad del circuito y permitir la implementación de filtros digitales los cuales favorecen el tratamiento de la señal al no suministrar ruido adicional.

De otro lado, este Proyecto abre la posibilidad de que otros problemas en el campo industrial puedan ser resueltos mediante la utilización de técnicas basadas en el ultrasonido, gracias a la versatilidad que este principio físico ofrece. Entre las principales aplicaciones que pueden ser realizables se tienen: un sistema de alarma, un detector de proximidad, un medidor de espesores, un sistema de limpieza para ductos, etc.

Es así como, se deja abierta la posibilidad de que otros estudiantes ingresen a este maravilloso mundo del ultrasonido, que si bien presenta algunas dificultades por el manejo de la señal, también es reto interesantísimo que al asumirlo lo único que proporciona son posibilidades de adquirir conocimiento tanto a nivel científico como a nivel tecnológico.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] **PND**; http://www.sieend.com.mx/sieend_pnd.htm
- [2] **El ensayo de ultrasonido para el control pieza-por-pieza de la calidad del producto**; <http://www.mty.itesm.mx/die/ddre/transferecia/59/59-III.03.html>
- [3] **History of Ultrasonics**; <http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Ultrasonics/Introduction/history.htm>
- [4] **Evaluación no Destructiva**;
http://www.hemerodigital.unam.mx/ANUIES/ipn/ese_y_esp/esia8/inter2/sec_1.html
- [5] **Ensayos no Destructivos**; http://www.sieend.com.mx/sieend_fs.htm
- [6] **Evaluación no Destructiva (END)**; http://ingeman.net/Tecnicas_END.htm
- [7] H. Franke; DICCIONARIO DE LA FÍSICA; Vol. 2; Editorial Labor, S.A; Barcelona (España) 1967. H. Franke; DICCIONARIO DE LA FÍSICA; Vol. 2; Editorial Labor, S.A; Barcelona (España) 1967.
- [8] **Ultrasonido Industrial**; <http://www.sieend.com.mx/sieend%20ut.htm>
- [9] Charles Belove; HANDBOOK OF MODERN ELECTRONICS AND ELECTRICAL ENGINEERING; Ed. John Wiley & Sons, Inc; United States of America.
- [10] **Basic Principles of Ultrasonic Testing**; <http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Ultrasonics/Introduction/description.htm>
- [11] **Tecnologías rápidas para evaluación no destructiva por ultrasonidos**;
<http://www.sercobe.es/espejo/Produccion/InspControl/tutorial/ultrasonidos.htm>
- [12] **Ultrasonido**; <http://mx.geocities.com/pndmx/ultrasónico.html>
- [13] **Wave Propagation**; <http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Ultrasonics/Physics/wavepropagation.htm>
- [14] **Ondas Mecánicas – Generalidades**;
http://www.unalmed.edu.co/~daristiz/notas_clase/clases_fisica3/clase_ondas/documentos/ondas_mecanicas_generalidades.PDF
- [15] **Acústica**; <http://webs.ono.com/usr047/luisandelas/acust.htm>

- [16] **Tendencias de Aplicaciones de Ultrasonido;**
<http://www.jeuazarru.com/html/ultrasonido.html>
- [17] **Ultrasonic Transducers for Nondestructive Testing;**
<http://www.olympusndt.com/data/File/panametrics-UT.pdf>
- [18] **Pruebas no destructivas – Ultrasonido;**
<http://www.gestiopolis.com/recursos/documentos/fulldocs/ger1/disultra.htm>
- [19] Hecht Eugene, Zajac Alfred; **Óptica;** Ed. Addison-Wesley Iberoamericana, S.A.; Wilmington, Delaware; U.S.A; 1986
- [20] Kinsler, L.E.; Frey A. R; Coppens y J.V Sanders; **Fundamentos de Acústica;** Ed. Limusa; México 1995.
- [21] **Modes of Sound Wave Propagation;** <http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Ultrasonics/Physics/modepropagation.htm>
- [22] Filipczynski Leszek, Pawlowski Zdzislaw y Wehr Jerzy; **Ultrasonic Methods of Testing Materials;** Butterworth & Co (Publisher) Ltd; Londres; 1966.
- [23] Lester W. Schmerr, Jr.; **Fundamentals of Ultrasonic Nondestructive Evaluation;** Plenum Press; New York; 1998.
- [24] Luis A. de Vedia; **Mecanica del Continuo.**
- [25] I. S. Sokolnikoff; **Análisis Tensorial;** editorial Limusa; México; 1976.
- [26] **Capítulo 1 - Ecuación de onda en medio elástico;**
<http://posgrado.cifus.uson.mx/betsa1.pdf>
- [27] **Sound Propagation in Elastic Materials;** <http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Ultrasonics/Physics/elasticssolids.htm>
- [28] **Attenuation of Sound Waves;** <http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Ultrasonics/Physics/attenuation.htm>
- [29] **Acústica básica;** <http://www.arrakis.es/~avf/acustica/acustica.htm>
- [30] **Acoustic Impedance;** <http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Ultrasonics/Physics/acousticimpedance.htm>
- [31] **Introducción;**
http://comunidad.ciudad.com.ar/argentina/capital_federal/fisioterapia/documentos/ultrasonido/introduccion.htm

- [32] **Bases físicas de la biomicroscopia ultrasónica;** <http://www.oftalmo.com/publicaciones/biomicroscopia/cap1.htm>
- [33] **Refraction and Snell's Law;** <http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Ultrasonics/Physics/refractionsnells.htm>
- [34] **Wave Interaction or Interferente;** <http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Ultrasonics/Physics/WaveInterference.htm>
- [35] **Propiedades de los materiales;** <http://w3.cnice.mec.es/recursos/bachillerato/tecnologia/manual/materiales/prop.htm>
- [36] **Propiedades de los metales;** <http://www.utp.edu.co/~publio17/propiedades.htm>
- [37] **La evaluación no destructiva de materiales estructurales y puentes;** <http://boletin.imt.mx/publicaciones/pubtec/pt231.pdf>
- [38] **Data Presentation;** <http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Ultrasonics/EquipmentTrans/DataPres.htm>
- [39] **Piezoelectric Transducers;** <http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Ultrasonics/EquipmentTrans/piezotransducers.htm>
- [40] **Characteristics of Piezoelectric Transducers;** <http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Ultrasonics/EquipmentTrans/characteristicspt.htm>
- [41] **La tecnología del Ultrasonido;** <http://www.mevepa.cl/modules.php?name=News&file=article&sid=215>
- [42] **Radiated Fields of Ultrasonic Transducers;** <http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Ultrasonics/EquipmentTrans/radiatedfields.htm>
- [43] **Transducer Beam Spread;** <http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Ultrasonics/EquipmentTrans/beamspread.htm>
- [44] **Transducer Types;** <http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Ultrasonics/EquipmentTrans/transduceratypes.htm>
- [45] **Caracterización de transductores ultrasónicos;** <http://www.cnea.gov.ar/coc/endye/ined/US/TRANSD/transd.html>

- [46] **Procesamiento digital de señales ultrasónicas en END;**
<http://www.iai.csic.es/ritul/PubCartagena/Luis/pdsend.doc>
- [47] **Principios de ultrasonido y aplicaciones;**
<http://www.desi.iteso.mx/elec/instru/ultrason.pdf>
- [48] **Transistor 2N3053,A;** <http://www.ortodoxism.ro/datasheets/boca/2N3053A.pdf>
- [49] Albert Paul Malvino, Ph. D; **Principios de electrónica;** McGraw-Hill; Mexico; 1979.
- [50] **LM837 Low Noise Quad Operational Amplifier;**
<http://cache.national.com/ds/LM/LM837.pdf>
- [51] Antonio Pertence Junior; **Amplificadores operacionales y filtros activos;** McGraw-Hill/Interamericana de España S. A. 1991.
- [52] **Active Filter Design Techniques;** <http://focus.ti.com/lit/ml/sloa088/sloa088.pdf>
- [53] **Componentes y circuitos electrónicos;**
<http://usuarios.lycos.es/zupeiza/downl/gonp3.pdf>
- [54] **PIC18FXX2 Data Sheet;**
<http://www.microchip.com/downloads/en/devicedoc/39564b.pdf>
- [55] **HI1175 - 8-Bit, 20MSPS, Flash A/D Converter;**

ANEXOS

ANEXO - A

Propiedades acústicas de los materiales metálicos tomados como referencia ^[17].

Material	Velocidad Longitudinal		Velocidad Transversal		Impedancia Acústica (Kg/m ² s x 10 ⁶)
	(pulg/μs)*	(m/s)	(pulg/μs)*	(m/s)	
Aluminio	0.249	6,320	0.123	3,130	17.06
Latón, naval	0.174	4,430	0.083	2,120	37.30
Cobre	0.183	4,660	0.089	2,260	41.61
Oro	0.128	3,240	0.047	1,200	62.60
Hierro	0.232	5,900	0.127	3,230	45.43
Hierro, (fundido lento)	0.138	3,500	0.087	2,200	25.00
Hierro, (fundido rápido)	0.220	5,600	0.126	3,220	40.00
Plomo	0.085	2,160	0.028	700	24.49
Manganeso	0.183	4,660	0.093	2,350	34.44
Níquel, puro	0.222	5,630	0.117	2,960	49.99
Platino	0.156	3,960	0.066	1,670	84.74
Plata	0.142	3,600	0.063	1,590	37.76
Acero, 1020	0.232	5,890	0.128	3,240	45.63
Acero, 4340	0.230	5,850	0.128	3,240	45.63
Acero, 302	0.223	5,660	0.123	3,120	45.45
Acero austenítico inoxidable, 347	0.226	5,740	0.122	3,090	45.40
Estaño austenítico inoxidable	0.131	3,320	0.066	1,670	24.20
Tungsteno	0.204	5,180	0.113	2,870	99.72
Zinc	0.164	4,170	0.095	2,410	29.61

ANEXO - B

Acoples Ultrasónicos ^[17] y ^[18].

Sustancia de acople	Velocidad Longitudinal		Densidad (g/cm ³)	Impedancia Acústica (g/cm ² -s x10 ⁵)
	m/s	pulg/μs		
Agua (20° C).	1480	.0583	1.000	1.483
Agua de Mar.	1530	.0602	1.025	1.572
Aceite de Motor (SAE 20).	1740	.0685	.870	1.510
Aceite de Oliva.	1430	.0563	.948	1.391
Aceite de Ricino	1480	.0583	.969	1.430
Aceite Parafina.	1420	.0559	.835	1.860
Glycerin	1920	.0756	1.260	2.420

ANEXO - C

Materiales Piezoeléctricos ^[18].

MATERIAL	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Cuarzo.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Se obtiene a partir de cristales naturales. ▪ Posee excelentes características, estabilidad térmica, química y eléctrica. ▪ Es muy duro y resistente al desgaste así como al envejecimiento. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Sufre interferencias en el modo de conversión. ▪ Es el menos eficiente de los generadores de energía acústica. ▪ Requiere alto voltaje para su manejo a bajas frecuencias. ▪ Se debe emplear a temperaturas menores de 550°C, pues por arriba de ésta pierde sus propiedades piezoeléctricas.
Sulfato de Litio.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Receptor más eficiente. ▪ Facilidad de obtener una amortiguación acústica óptima. ▪ Mejor poder de resolución. ▪ No envejece. ▪ Es poco afectado por la interferencia en el modo de conversión. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Es muy frágil ▪ Soluble en agua ▪ Se debe emplear a temperaturas menores de 75°C.
Cerámicos Polarizados.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Se obtienen por sinterización y se polarizan durante el proceso de fabricación. ▪ Se consideran como los generadores más eficientes de energía ultrasónica cuando operan a bajos voltajes de excitación. ▪ Prácticamente no son afectados por la humedad ▪ Algunos pueden emplearse hasta temperaturas de 300°C. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Resistencia mecánica relativamente baja, ▪ En algunos casos existe interferencia en el modo de conversión. ▪ Presentan tendencia al envejecimiento. ▪ Además poseen menor dureza y resistencia al desgaste que el cuarzo.

Titanato de Bario.	Es un buen emisor debido a su elevado modulo piezoeléctrico.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Problemas de acoplamiento y amortiguación. ▪ Su empleo esta limitado a frecuencias menores de 15 MHz, debido a su baja resistencia mecánica y alta impedancia acústica. ▪ Presenta interacción entre varios modos de vibración. ▪ La temperatura de su punto curie es de 115 – 150 °C.
Metaniobato de Bario.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Presenta un modulo piezoeléctrico elevado lo que lo califica como buen emisor. ▪ Posee excelente estabilidad térmica, similar al cuarzo, lo que le permite ser empleado a altas temperaturas. ▪ Posee un elevado coeficiente de amortiguación interna, por lo que se considera como el mejor material para generar impulsos cortos. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Presenta una baja frecuencia fundamental y una mala resistencia mecánica, por lo que se aplica principalmente a frecuencias altas. ▪ Presenta interacción entre varios modos de vibración.
Zirconato Titanato de Plomo.	Se considera como el mejor emisor por su alto modulo piezoeléctrico.	Sin embargo, es el mas difícil de amortiguar por su alto coeficiente de deformación. Se recomienda su empleo cuando existen problemas de penetración.

ANEXO - D

Características y especificaciones de los materiales utilizados como elemento activo en los transductores ultrasónicos ^[18]

Material	Eficiencia como transmisor	Eficiencia como receptor	Sensibilidad	Poder de resolución	Características mecánicas
Cuarzo	Mala	Mediana	Escasa	Optima	Buena
Sulfato de litio	Mediana	Buena	Buena	Optima	Soluble en agua
Titanato de bario	Buena	Mediana	Optima	Mediana	Frágil
Metaniobato de bario	Buena	Mediana	Optima	Optima	Buena
Zirconato titanato de plomo	Buena	Mediana	Optima	Mediana	Buena

ANEXO - E

Cables coaxiales estándares de Panametrics ^[17].

Tipo	Grado	Impedancia	Diámetro Nominal
15	Baja Impedancia	15 Ω	0.11"
25	Baja Impedancia	25 Ω	0.10"
58	RG58/U	50 Ω	0.20"
62	RG62/U	93 Ω	0.24"
74	RG174/U	50 Ω	0.11"
188	RG188/U	50 Ω	0.11"
316	RG316/U	50 Ω	N/A
RG \equiv Cable coaxial			
RG/U \equiv Guía de radio, universal			
U \equiv Utilidad general			

La mayoría de los cables utilizados en NDT por ultrasonido tiene números militares RG que definen los materiales, las dimensiones, y las características eléctricas de los cables.

ANEXO - F

Hoja de prueba del transductor A107S - RB.



221 Crescent St Waltham, MA 02453-3487
 Tel: 800-225-8330, 781-899-2719
PANAMETRICS Fax: 781-899-1552

TRANSUCER DESCRIPTION

PART NO.: A107S
 SERIAL NO.: 325348
 DESIGNATION: CONTACT
 FREQUENCY: 5.00 MHz
 ELEMENT SIZE: 1 IN. DIA.

TEST INSTRUMENTATION

PULSER/RECEIVER: PANAMETRICS 5052UA #1
 DIGITAL OSCILLOSCOPE: L4C00Y LT342 / SN: LT34201891
 TEST PROGRAM: TP103-3 VER. 10240F
 CABLE: RG 174/U LENGTH: 4FT

TEST CONDITIONS

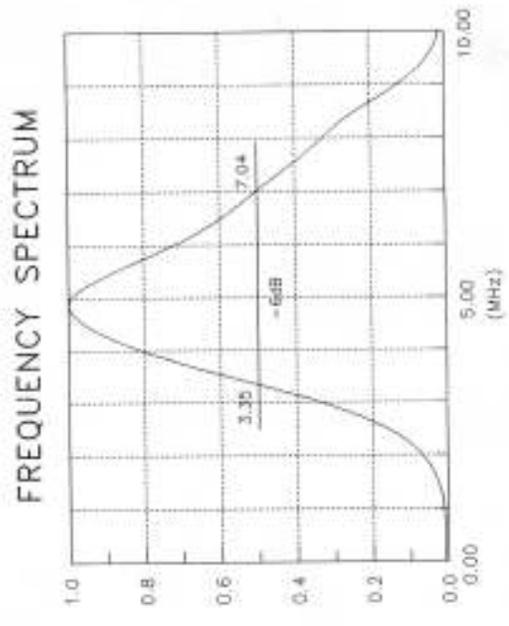
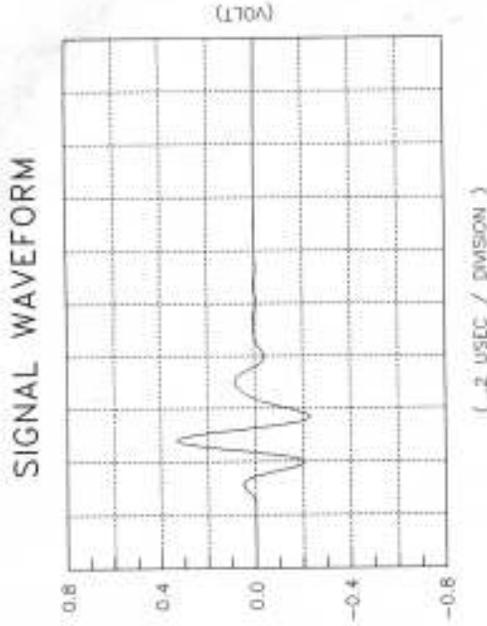
PULSER SETTING: ENERGY: 1 ; DAMPING: 50 ohm
 RECEIVER SETTING: ATTN: 54dB ; GAIN: 40dB
 TARGET: 2 IN. SILICA
 JOB CODE: TP200

MEASUREMENTS PER ASTM E1065

WAVEFORM DURATION: SPECTRUM MEASUREMENTS:
 -14DB LEVEL -- 370US CENTER FREQ. --- 5.20MHz
 -20DB LEVEL -- 0.52US PEAK FREQUENCY -- 4.88MHz
 -40DB LEVEL -- 0.84US -5DB BANDWIDTH -- 71.051 kHz

COMMENTS:

** ACCEPTED.
 TECHNICIAN: (3) *David Santiago* DATE: 11-21-2002



ANEXO - G

Hoja de prueba del transductor A409S - RB.



221 Crescent St Waltham MA 02453-3497
 Tel: 800-225-8330, 781-899-2719
 PANAMETRICS Fac: 781-899-1552

TRANSDUCER DESCRIPTION

PART NO.: A409S FREQUENCY: 5.00 MHz
 SERIAL NO.: 316574 ELEMENT SIZE: 1.0 in. DIA.
 DESIGNATION: CONTACT

TEST INSTRUMENTATION

PULSER/RECEIVER: PANAMETRICS 5052 UA #1
 DIGITAL OSCILLOSCOPE: LECROY 9400 - V 2.08FT JED333
 TEST PROGRAM: TP103-1 VER. 3/8/82 SETUP: DWG #51978
 CABLE: RC-58/U LENGTH: 4 FT.

TEST CONDITIONS

PULSER ENERGY: 1
 PULSER DAMPING: 50 ohm
 RECEIVER SETTING: 40 dB GAIN / 54dB ATTENUATION
 TARGET: BACK WALL OF 50 in POLYSTYRENE

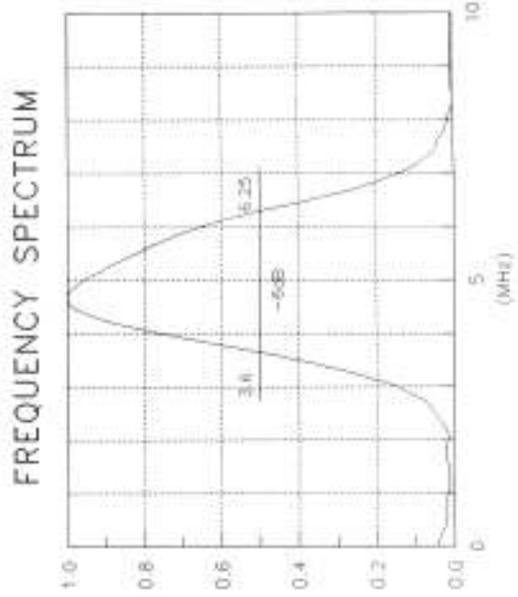
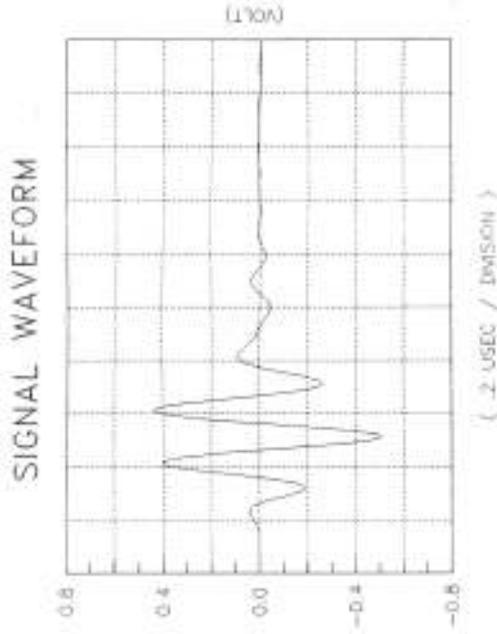
MEASUREMENTS PER ASTM E1065

WAVEFORM DURATION: SPECTRUM MEASURANDS:
 -14dB LEVEL -- 46.4US CENTER FREQ. --- 4.93MHz
 -20dB LEVEL -- 57.8US PEAK FREQUENCY -- 4.65MHz
 -40dB LEVEL -- 2.00US* -60B BANDWIDTH -- 53.81 *

COMMENTS:

*THE MEASUREMENT NOT PERFORMED OR UNRELIABLE.

** ACCEPTED
 TECHNICIAN (3) *David Spectors* DATE: 01-11-02



ANEXO - H

Distancias focales para palpadores de la firma Panametrics ^[17].

Frecuencia	Distancia Focal
5.0MHz	13.0 pulg.
7.5MHz	6.0 pulg.
10.0MHz	3.5 pulg.
15.0MHz	1.5 pulg .
20.0MHz	0.8 pulg.
25.0MHz	0.5 pulg.
30.0MHz	0.4 pulg.

ANEXO – I

Información suministrada por Panametrics, sobre las especificaciones técnicas de los transductores A107S - RB y A409S - RB.



No tenemos un conjunto específico de opciones en las cuales el cliente utilizará con más probabilidad esta sonda. El transductor fue diseñado para excitación de pico negativo y debe ser capaz de manejar pulsos de picos de 500V. La corriente a través del transductor es muy pequeña. En general evaluamos el transductor para una potencia de entrada total de 0.125W, que puede ser una valoración ligeramente conservadora, pero es lo que nosotros colocamos a través de todos los transductores. Excitar el transductor con ondas continuas requiere niveles de voltaje mucho más bajos dependiendo de la duración de pulso y del ciclo de servicio. Adjunto un documento que debe suministrar alguna información adicional al cliente, si el de verdad excita la sonda en modo de corriente continua. La impedancia de transductor en la frecuencia central es aproximadamente 150 ohmios - yo utilizaría esto para este número de parte en particular.

Pautas para la excitación de corriente continua

Todos los transductores Panametrics, como regla general, están diseñados para una excitación de pico negativo. La excitación debe ser un potencial de voltaje negativo con respecto a tierra. El pico máximo del voltaje de excitación se debe limitar a aproximadamente 50 voltios por milésima de pulgada del espesor del elemento piezoeléctrico. Un pico de excitación de 600 voltios, de rápido tiempo de subida, y corta duración se puede utilizar a través de los terminales de un transductor de 5 MHz y frecuencias inferiores. Para transductores de 10 MHz, el voltaje utilizado a través de los terminales debe reducirse a la mitad, esto es 300 voltios aproximadamente medidos a través de los terminales. Excitaciones de DC o Corriente continua pueden causar despolarización del elemento o crear requerimientos de disipación excesiva de potencia. Para estas aplicaciones, por favor consulte a Panametrics.

Si se utilizan excitaciones de corriente continua o ráfagas de tonos (tone burts), se le advierte al cliente que este es su riesgo personal. Recomendamos que solamente utilicen nuestros transductores videoscán, porque no tienen ningún dispositivo de afinación que pueda quemarse con excitaciones de corriente continua o ráfagas de tonos (El **tone burst** consiste en un tono puro (senoidal) limitado a un pequeño número de ciclos).

Cuando utilice excitaciones de corriente continua o ráfagas de tonos con transductores Panametrics, la disipación de potencia media total para el transductor no debe superar 0.125 watos, en razón a evitar el sobrecalentamiento del transductor y la despolarización externa del cristal. La potencia media total depende de un número de factores tales como voltaje, ciclo de servicio e impedancia eléctrica del transductor. Las siguientes ecuaciones se pueden utilizar para calcular que la duración de la máxima excitación, y el número de ciclos en una ráfaga para permanecer dentro del límite de potencia total:

$$V_{rms} = \frac{1}{2}(0.707)V_{p-p} \quad (1)$$

$$P_{tot} = \frac{(DUTYCYCLE)(V_{rms})^2}{|Z|} \text{COS}(Phase\ Angle) \quad (2)$$

$$NO.OFCYCLES \in BURST = \frac{(FREQ.)(DUTYCYCLE)}{REPRATE} \quad (3)$$

Ejemplo: Calcule el ciclo de funcionamiento recomendado y el periodo para el transductor V310-SU, de 5MHz.

Asumiendo: 100 V_{p-p}
 50 Ω impedancia nominal como impedancia de entrada al transductor.
 -45° Angulo fase.
 5kHz Período de repetición.

STEP 1: Calcule V_{rms}

$$V_{rms} = 1/2 (0.707)V_{p-p}$$

$$V_{rms} = 1/2 (0.707)(100) = 35.35V_{rms}$$

STEP 2: La potencia total disipada por el transductor no debe exceder los 0.125 Watos 0.125 Watos, entonces el ciclo de servicio se puede calcular de la ecuación No. 2, así:

$$DUTYCYCLE = \frac{|Z| P_{TOT}}{(V_{rms})^2 \text{COS}(\Theta)} = \frac{(50)(0.125)}{(35.35)^2 \cos(-45^\circ)} = 0.007 \text{ seg / seg}$$

(Esto significa 7 milisegundos de excitación cada 1000 milisegundos)

STEP 3: El número de ciclos en la ráfaga se puede calcular ahora de la ecuación No. 3 como sigue:

$$NO.OFCYCLES \in ABURST = \frac{(FREQ.)(DUTYCYCLE)}{REPRATE}$$

$$= \frac{(5 \times 10^6)(0.007)}{5 \times 10^3}$$

NO.OFCYCLES ∈ *ABURST* = 7

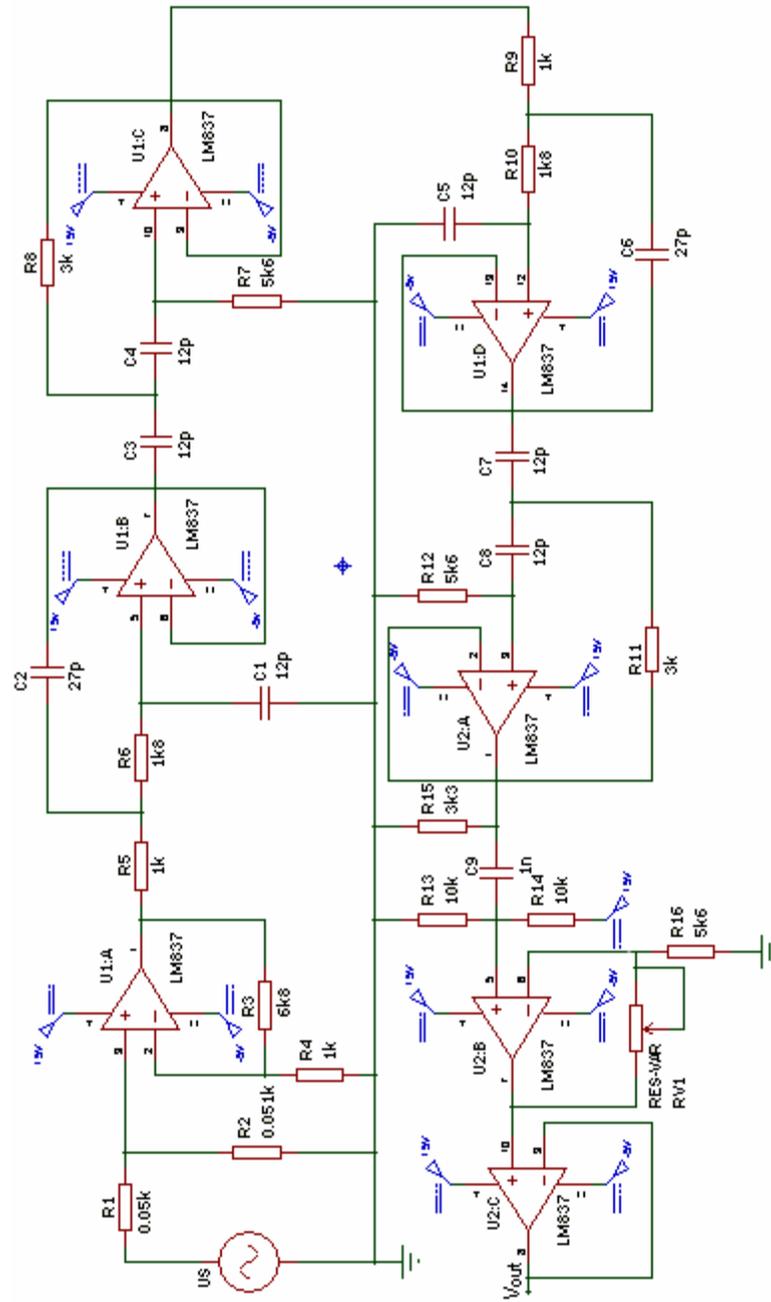
El ejemplo anterior muestra que un transductor V310- SU se puede utilizar en ráfagas de tonos de 7 ciclos y 0.007 milisegundos de duración. Las otras variables se pueden cambiar dentro de sus límites, siempre y cuando la potencia media se mantenga por debajo de 0.125 Watios de potencia. El factor que no puede ser controlado en estas mediciones es la impedancia del transductor.

A los clientes que deciden utilizar este tipo de técnica de pulsos se les aconseja consultar con Panametrics con su número de parte específica para asegurar que su transductor no tiene ninguna red de afinación, así como pedir las trazas de impedancia de su transductor al momento de la compra.

El mínimo voltaje dependerá del tipo del pulso que están enviando a la sonda y que necesitan conseguir fuera de esta. Es posible enviar picos de voltaje de 40V pero la amplitud será muy pequeña, así que dependiendo de la aplicación esta puede ser o no ser suficiente. Si utilizan excitación de ráfagas de tono, pueden necesitar menos voltaje, pero nuevamente esto depende de la aplicación. Yo sugeriría que empiecen con voltajes bajos y los vayan incrementando hasta que tengan una señal suficiente para la aplicación.

ANEXO - J

Circuito total de la etapa de acondicionamiento de la señal.



ANEXO - K

El programa en pseudocódigo para el PIC 18F452.

INICIO

```
//Configuración inicial
OSCON ← 0;           // Usa oscilador primario
STATUS ← 0;         // Clarea el registro de estado
RCON ← 0xFF;       //Registro de control de Reset
INTCON ← 0;        //Deshabilitadas las interrupciones
INTCON2 ← 0;       //
INTCON3 ← 0;
IPR1 ← 0           //Todas la interrupciones en baja prioridad
PIR1 ← 0           //Clarea las banderas de interrupciones
PIR2 ← 0           //

//Configuración de puertos
TRISA ← 0x0;       //Puerto PORTA como salida
TRISB ← 0xFF;     //Puerto PORTB como entrada, salida alta impedancia.
TRISC ← 0x0;      //Puerto PORTC como salida
TRISD ← 0x0       //Puerto PORTD como salida
TRISE ← 0x0       //Puerto PORTE como salida

//Configuración de interrupción del TIMER0
Iniciar:           //Etiqueta a donde retorna cuando llegue al fin.
T0CON ← 00000000b //Configura el TIMMER de 16 bits, por reloj interno sin
                  //preescalado
TMR0H ← 0xF5      //Espera 2500 ciclos de maquina mientras se capturan
TMR0L ← 0x10      //500 microsegundos de muestras a 20 MHZ.

//Configuración del circuito externo
PORTA ← 0x0       //Bloquea la compuerta y clarea los contadores
PORTA ← 0x03      //Habilita los contadores para que generen direcciones
                  //y deja pasar el tren de pulsos al transductor
PORTE ← 0x01      //Habilita la escritura en memoria y direccionamiento
                  //por contadores
INTCON ← 10100000b //Habilita la interrupción del TIMMER 0
T0CON ← 1000000b  //Enciende el temporizador.
NOP               //Instrucción de retardo
NOP               //
```

```

PORTA ← 0x01           //Cierra el paso del tren de pulsos al transductor
Mientras (TMR0IF == 0) { //Espera a que el temporizador genere interrupción
}
INTCON ← 0x0           //Deshabilita las interrupciones
PORTE ← 0x07           //Deshabilita los contadores y el ADC
PORTA ← 0x0           //Deshabilita los contadores

//Configuración de la comunicación serial
TXSTA ← 01100110b      //Configuración del registro de transmisión.
RCSTA ← 11010000b      //Configura el registro de recepción y estado.
BRG ← 10                //Comunicación a 115200 baudios
PIE1 ← 00010000b       //Habilita la interrupción de transmisión
INTCON ← 10000000b     //Habilita las interrupciones.

//Comienza a leer la memoria y a transmitir
PORTE ← 0x02           //Habilita los mux y la memoria para leer
TRISB ← 0xFF           //PORTB como entrada de datos
direccion ← 0x0        //Inicia una variable de direccionamiento
Mientras (direccion < 10010) { //Hasta llegar al final de la memoria activa
    Si (TXIF == 1) { //No hay datos pendientes por transmitir.
        PORTC:PORTD ← direccion //Asigna la dirección a los puertos
        Valor ← PORTB           //Lee el puerto B, memoria.
        TXREG ← Valor           //Carga en el registro el valor a transmitir
        direccion ++
    }
}
PORTE ← 0x07           //Deshabilita los circuitos externos

//Espera un valor de confirmación desde el PC
PIE1 ← 00100000b       //Habilita la interrupción de recepción
Valor ←                 //Clarea la variable que recibe la confirmación
Mientras (Valor != 107d) { //Espera la palabra de confirmación
    Si (RCIF == 1) { //Ha detectado un Byte en recepción
        Valor ← RCREG; //Lee el valor recibido en el búfer.
    }
}
}
Saltar a Iniciar
FIN.

```


ANEXO - M

SOLUCIÓN ALTERNA

Dado que el diseño del Analizador Ultrasónico nos propone la implementación de un circuito análogo-digital, compuesto por un número considerable de circuitos integrados y dispositivos electrónicos; es muy probable que al realizar el montaje este circuito no funcione de la manera esperada debido a la complejidad que por sí solo reviste. Por tanto, se sugiere una solución alterna que puede reducir en aproximadamente un 90% el hardware implicado en el diseño aún solo dispositivo electrónico, este dispositivo es un DSP con suficiente memoria interna para almacenar la cantidad de datos necesarios, con la velocidad de procesamiento necesaria para capturar las muestras de llegada del ultrasonido y con un convertor ADC de alta velocidad incorporado y manejado por software.

Un ejemplo de DSP con estas prestaciones es el ADSP 21992 de Analog Device, el cual tiene como características:

- ☆ DSP de punto fijo que puede operar hasta 160 MIPS
- ☆ RAM de 48K palabras, de 24 y 16 bits.
- ☆ Interfaz hacia memoria externa con DMA
- ☆ Generación de reloj de sistema basado en PLL
- ☆ Soporta JTAG
- ☆ Convertor análogo / digital de hasta 20 MSPS de 14 bits.
- ☆ Generadores de señal PWM
- ☆ 16 entradas/salidas de propósito general
- ☆ Puertos de comunicación serial SPORT y USART.
- ☆ Módulo CAN.
- ☆ Control de interrupciones con prioridad.
- ☆ Programable mediante código ensamblador y C/C++ usando Visual DSP++.
- ☆ Voltaje de operación 3.3 Voltios, con operación interna a 2.5 voltios.

A través del DSP se pueden implementar las siguientes etapas del circuito del Analizador Ultrasónico:

- ☆ Generación del tren de pulsos o ráfaga de tonos para la excitación del transductor en modo de transmisión.
- ☆ Filtrado digital de la señal que recibe el transductor en modo de recepción.
- ☆ Conversión A/D a una frecuencia de muestreo de 20 MSPS y una resolución de 14 bits.
- ☆ Almacenamiento temporal de los datos que emite el convertor A/D.

- ☆ Envío de los datos al computador a través del puerto serial bajo el protocolo RS-232, a la máxima frecuencia usando el módulo USART y un circuito MAX232.
- ☆ Aplicar un filtro antialias, reducción de ruido y compensación antes de enviar las muestras al PC.

La siguiente figura presenta el diagrama de bloques funcional del ADSP 21992 de Analog Device.

