

PROTOTIPO EXPERIMENTAL PARA LA DETECCIÓN DE FALLAS POR ULTRASONIDO EN TUBERÍA METÁLICA

CARLOS ALFONSO LÓPEZ AMOROCHO

WILMER ALEXÁNDER SÁNCHEZ CARVAJAL



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS**

ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

BUCARAMANGA

2013

PROTOTIPO EXPERIMENTAL PARA LA DETECCIÓN DE FALLAS POR ULTRASONIDO EN TUBERÍA METÁLICA

CARLOS ALFONSO LÓPEZ AMOROCHO

WILMER ALEXÁNDER SÁNCHEZ CARVAJAL

**Trabajo de Grado para optar al título de
Ingeniero Mecánico**

Director

Dr. CARLOS BORRÁS PINILLA

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

BUCARAMANGA

2013

AGRADECIMIENTOS

A Dios y a nuestras familias, que siempre nos acompañan incondicionalmente en todo nuestro proceso de formación, con el apoyo y la fuerza para seguir adelante.

Al profesor Carlos Borrás Pinilla, director de nuestro trabajo de grado por la asesoría y participación en el desarrollo de esta etapa.

A la Universidad Industrial de Santander y en especial a la Escuela de Ingeniería Mecánica, por brindarnos estos años de formación profesional.

Al Ingeniero Miguel Humberto Diago, por compartirnos sus conocimientos y acompañarnos en la realización de pruebas con el equipo EPOCH XT.

Al Ingeniero electrónico Michael Hernández por su ayuda en electrónica.

A todas las personas que de alguna forma nos prestaron su apoyo en el transcurso de nuestro trabajo de grado.

DEDICATORIA

A Dios por brindarme salud y vida para avanzar cada día...

A mi madre Nubia por su amor, comprensión y apoyo al acompañarme todos los días con su voz de aliento y fortaleza para alcanzar esta meta...

A mi padre Ernesto por su gran apoyo sin importar las circunstancias y ser mi guía con su ejemplo de vida...

A mi hermano Duver quien me acompaña en cualquier momento sin importar la dificultad y siempre está dispuesto a escucharme...

A mis familiares que siempre han estado presentes en este proceso de aprendizaje...

A mis amigos quienes hacen parte de este título, porque gracias a ellos este camino ha sido más sencillo...

Wilmer Alexander Sánchez Carvajal

DEDICATORIA

Este trabajo lo dedico primeramente a Dios por haberme permitido llegar hasta este punto, por haberme dado salud y darme lo necesario para seguir adelante día a día para lograr mis objetivos, además de su infinita bondad y amor.

A mi madre por haber apoyado en todo momento, por sus consejos, valores, por la motivación constante que me ha permitido ser una persona de bien, pero más que cualquier otra cosa, su inmenso amor.

A mi padre por los ejemplos de perseverancia y constancia que lo caracterizan y que me ah infundado siempre, por el valor mostrado para salir adelante y por su amor.

A mis hermanos y aquellas personas por su apoyo y compañía, que de alguna u otra forma han estado presentes y me han ayudado incondicionalmente en este largo camino...

Carlos Alfonso López Amorochio

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	22
1. MANTENIMIENTO, GENERALIDADES Y DEFINICIONES	23
1.1 DEFINICIONES	23
1.2 EL MANTENIMIENTO CORRECTIVO	24
1.3 EL MANTENIMIENTO PREVENTIVO	24
1.4 MANTENIMIENTO PREDICTIVO	25
1.4.1 Generalidades	25
1.4.2 Beneficios del mantenimiento predictivo.....	26
2. INTRODUCCIÓN A LAS PRUEBAS NO DESTRUCTIVAS (PND)	28
2.1 MÉTODOS DE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS.....	30
2.1.1 Análisis de Vibraciones	30
2.1.2 Termografía Infrarroja	31
2.1.3 Análisis de Aceites	32
2.1.4 Análisis espectral de intensidades de corrientes.....	33
2.1.5 Análisis del flujo de dispersión	34
2.1.6 Detección ultrasónica.....	34
3. EL SONIDO	36
3.1 CUALIDADES DEL SONIDO	36
3.1.1 Intensidad.....	37
3.1.2 Tono.	38
3.1.3 Timbre.	38
3.2 CUALIDADES DE UNA ONDA SONORA	39
3.2.1 Periodo.....	39
3.2.2 Frecuencia	39
3.2.3 Amplitud	40
3.2.4 Longitud de onda.	40
3.3 VELOCIDAD DEL SONIDO.....	41
3.4 ONDAS ESTACIONARIAS.....	42
3.5 VELOCIDAD ACÚSTICA.....	43

3.6 PRESIÓN ACÚSTICA	44
3.7 INTENSIDAD ACÚSTICA.....	44
4. ULTRASONIDO	45
4.1 MODO DE PROPAGACIÓN DE LAS ONDAS ULTRASÓNICAS	48
4.1.1 Ondas Longitudinales o de Compresión.....	49
4.1.2 Ondas Transversales o de Cizalladura.....	51
4.1.3 Ondas Superficiales o de Rayleigh.....	53
Fuente:	54
4.1.4 Ondas de Lamb.....	55
4.2 IMPEDANCIA DE LA ONDA ACÚSTICA.....	57
4.3 INTERCAMBIO DE ENERGÍA DE UN MEDIO A OTRO	58
4.4 INCIDENCIA ANGULAR	59
4.5 MODOS DE ONDA Y SU RELACIÓN	60
4.5.1 Onda Incidente de Compresión o Longitud.	60
4.5.2 Onda Incidente Cortante o Transversal.....	61
4.6 ÁNGULOS CRÍTICOS.....	62
4.6.1 Primer Ángulo Crítico.....	62
4.6.2 Segundo Ángulo Crítico.....	63
4.7 FACTORES IMPORTANTES EN LA TRANSMISIÓN DE ULTRASONIDO POR LA SUPERFICIE DE EXPLORACIÓN	63
4.7.1 Medio de Acoplamiento	64
4.7.2 Acabado Superficial	65
4.7.2.1 Efecto de la Condición Superficial	65
4.7.2.2 Efecto del acabado superficial	66
4.7.3 Curvatura Superficial.....	67
4.7.4 Frecuencia y diámetro del Cristal	67
5. METODOS Y TÉCNICAS BÁSICAS APLICADOS EN LA INSPECCIÓN POR ULTRASONIDO	68
5.1 MÉTODO POR CONTACTO DIRECTO.....	68
5.1.1 Técnica de haz normal.....	68
5.1.2 Técnica de haz angular.....	69
5.1.3 Técnica de haz superficial	71
5.2 MÉTODO POR INMERSIÓN.....	72
5.2.1 Sistema de inmersión en tanque	72
5.2.2 Sistema de chorro de agua.....	73

5.2.3 Sistema de rueda	74
5.3 TÉCNICAS DE INMERSIÓN	75
5.3.1 Técnica de haz normal.....	75
5.3.2 Técnica de haz angular.....	75
5.4 VENTAJAS Y LIMITACIONES DE LOS MÉTODOS	76
5.4.1 Ventajas del método de contacto directo.....	76
5.4.2 Ventajas del método de inmersión.....	77
5.4.3 Limitaciones del Método de Contacto Directo	77
5.4.4 Limitaciones del Método de Inmersión	77
6. TRANSDUCTOR Y GENERACION DEL ULTRASONIDO.....	78
6.1 GENERACIÓN DEL ULTRASONIDO	78
6.1.1 Efecto piezoeléctrico.....	78
6.1.2 Efecto Magnetoestrictivo.....	80
6.2 ELEMENTOS QUE FORMAN PARTE DE UN TRANSDUCTOR ULTRASÓNICO.....	81
6.2.1 Elemento activo.....	82
6.2.2 El material de respaldo	82
6.2.3 La placa frontal o placa protectora.....	83
6.3 TIPOS DE TRANSDUCTORES ULTRASÓNICOS	84
6.3.1 Transductores de haz recto de contacto.....	84
6.3.2 Transductores de haz angular de contacto	85
6.3.3 Transductores de doble cristal (Duales) de contacto	86
6.3.4 Transductores de inmersión	87
6.4 CARACTERISTICAS AVANZADAS DE UN TRANSDUCTOR	88
6.4.1 Forma de Onda y espectro del transductor	88
6.4.2 Impedancia acústica, reflectividad y atenuación	88
6.4.3 Campo de sonido	89
6.4.4 Diámetro de la emisión	91
6.4.5 Zona de enfoque	92
6.5 EXITACION DE UN TRANSDUCTOR.....	92
6.5 COMO SELECCIONAR UN TRANSDUCTOR.....	94
7. TECNICASDE INSPECCIÓN EN EL ENSAYO ULTRASÓNICO.....	96
7.1 GENERALIDADES.....	96
7.2 SISTEMA DE EXCITACIÓN PARA GENERAR EL ULTRASONIDO	96
7.3 SISTEMA DE EMISIÓN Y RECEPCIÓN DEL ULTRASONIDO	97
7.3.1 Sistema de resonancia.....	97

7.3.2 Sistema de transmisión.....	97
7.3.3 Sistema de pulso-eco.....	99
7.3.3.1 Técnica de Pitch Catch	100
8. TIPOLOGIA DE FALLAS POR ULTRASONIDO.....	103
8.1. DIFERENCIA ENTRE REFLECTOR, DISCONTINUIDAD Y DEFECTO	103
8.1.1 Reflectores pequeños y grandes.	104
8.2. CLASIFICACIÓN DE LAS DISCONTINUIDADES	104
8.2.1. Discontinuidades Inherentes.....	104
8.2.2 Discontinuidades de proceso o fabricación.	105
8.2.3. Discontinuidades de servicio.	105
8.3 INTERPRETACIÓN DE LAS INDICACIONES	105
8.3.1. Características de las discontinuidades.....	105
8.3.1.1 Naturaleza de las discontinuidades.	105
8.3.1.2. Morfología de las Discontinuidades.	105
8.3.1.3. Orientación de las Discontinuidades.....	105
8.3.1.4. Posición de las Discontinuidades	106
8.3.1.5. Tamaño de las Discontinuidades.....	106
8.3.2. Detección e identificación de una discontinuidad.	106
8.3.2.1. Morfología de la Discontinuidad.....	106
8.3.2.2. Orientación de la discontinuidad.....	109
8.3.2.3 Posición de la discontinuidad.....	110
8.3.3 Criterios y técnicas para la determinación del tamaño de las discontinuidades.	111
8.3.3.1 Discontinuidades mayores que la sección transversal del haz ultrasónico.	111
8.3.3.2. Discontinuidades menores que la sección del haz ultrasónico.	112
9. PROTOTIPO EXPERIMENTAL DESARROLLADO	113
9.1 DESCRIPCIÓN DEL MONTAJE FISICO.....	114
9.2. SISTEMA EMISOR-RECEPTOR DE VARIABLES FÍSICAS.....	115
9.2.1. Transductores miniatura de haz angular.	115
9.2.2. Cable de conexión.	116
9.3. SISTEMA ELECTRÓNICO DE ACONDICIONAMIENTO	117
9.3.1 Placa electrónica de acondicionamiento.....	119
Fuente: Autores.....	120
Fuente: Autores.....	120
9.4 SISTEMA DE POTENCIA.....	121
9.4.1 Placa electronica de potencia.	121

9.5. SISTEMA PROCESADOR-RECEPTOR DE SEÑALES	122
9.5.1. <i>Tarjeta National Instruments</i>	122
9.6. SISTEMA DE INTERFASE CON EL USUARIO	122
9.6.1 <i>Software desarrollado</i>	122
9.6.2. <i>Elementos que conforman la pestaña 3</i>	126
9.6.4. <i>Descripción del software - diagrama de bloques</i>	127
9.7 METODOLOGIA IMPLEMENTADA PARA LA INSPECCIÓN	130
9.7.1. <i>Modo de visualización de los resultados</i>	131
10. PRUEBAS Y RESULTADOS	133
10.1 PRUEBAS REALIZADAS CON PROTOTIPO EXPERIMENTAL CONSTRUIDO	133
10.2 PRUEBAS CON EL EQUIPO EPOCH XT	142
CONCLUSIONES	148
RECOMENDACIONES.....	151
BIBLIOGRAFÍA	152
ANEXOS	155

LISTA DE FIGURAS

FIG 1 ESPECTRO DE VIBRACIÓN	31
FIG 2 TERMOGRAMA INDUSTRIAL	32
FIG 3 ANÁLISIS DE ACEITES	33
FIG 4 EQUIPO PARA ANÁLISIS ESPECTRAL	34
FIG 5 INSPECCIÓN MECÁNICA CON EQUIPO DE ULTRASONIDO EN BOMBAS	35
FIG 6 RELACIÓN ENTRE AMPLITUD Y LONGITUD DE ONDA	39
FIG 7 LONGITUD DE ONDA	40
FIG 8 RANGO DE FRECUENCIAS	47
FIG 9 ONDAS LONGITUDINALES O DE COMPRESIÓN	49
FIG 10 GENERACIÓN DE ONDAS LONGITUDINALES	50
FIG 11 ONDAS TRANSVERSALES O DE CIZALLADURA	51
FIG 12 GENERACIÓN DE ONDAS DE CORTE	52
FIG 13 ONDAS SUPERFICIALES O DE RAYLEIGH	53
FIG 14 GENERACIÓN DE ONDAS SUPERFICIALES	54
FIG 15 ONDAS SIMÉTRICAS O DE DILATACIÓN	56
FIG 16 ONDAS ASIMÉTRICAS O DE DEFLEXIÓN	56
FIG 17 TRANSFERENCIA DE ENERGÍA EN UNA SUPERFICIE	58
FIG 18 COMPORTAMIENTO DE UNA ONDA REFLEJADA Y REFRACTADA EN EL MATERIAL	60
FIG 19 ONDA REFLEJADA Y REFRACTADA DE UNA ONDA SONORA INCIDENTE DE COMPRESIÓN EN UN MATERIAL	60
FIG 20 ONDA REFLEJADA Y REFRACTADA DE UNA ONDA SONORA INCIDENTE DE CORTANTE EN UN MATERIAL	61
FIG 21 PRIMER ÁNGULO CRÍTICO	62
FIG 22 SEGUNDO ÁNGULO CRÍTICO	63
FIG 23 ACABADO SUPERFICIAL	66
FIG 24 TÉCNICA DE HAZ NORMAL	68
FIG 25 TÉCNICA DE HAZ ANGULAR	70
FIG 26 RELACIÓN ENTRE LOS ÁNGULOS DE INCIDENCIA Y REFRACCIÓN PARA ONDAS LONGITUDINALES Y TRANSVERSALES	71
FIG 27 TÉCNICA DE HAZ SUPERFICIAL	71

FIG 28 SISTEMA DE INMERSIÓN EN TANQUE	72
FIG 29 SISTEMA DE CHORRO DE AGUA	73
FIG 30 SISTEMA DE RUEDA	74
FIG 31 TÉCNICA DE HAZ NORMAL PARA INMERSIÓN	75
FIG 32 TÉCNICA DE HAZ ANGULAR PARA INMERSIÓN	76
FIG 33 ORIENTACIÓN TÍPICA DE UN CRISTAL DE CUARZO	79
FIG 34 EFECTO PIEZOELÉCTRICO.....	79
FIG 35 ETAPAS PARA LA GENERACIÓN DEL SONIDO	80
FIG 36 EFECTO MAGNETOESTRICTIVO.....	81
FIG 37 ELEMENTOS DE UN TRANSDUCTOR.....	82
FIG 38 PLACA PROTECTORA Y ELEMENTO ACTIVO	83
FIG 39 TRANSDUCTORES DE CONTACTO.....	84
FIG 40 TRANSDUCTORES DE HAZ ANGULAR	85
FIG 41 TRANSDUCTORES DUALES	86
FIG 42 TRANSDUCTORES DE INMERSIÓN	87
FIG 43 CAMPO LEJANO Y CERCANO.....	90
FIG 44 OTROS PARÁMETROS EN LA EMISIÓN DEL SONIDO.....	91
FIG 45 SISTEMA DE TRANSMISIÓN	98
FIG 46 SISTEMA DE PULSO-ECO	99
FIG 47 TÉCNICA DELTA	101
FIG 48 REFLECTORES PEQUEÑOS Y GRANDES.....	104
FIG 49 ESTUDIO DE UN REFLECTOR CON MORFOLOGÍA PLANA MEDIANTE UN PALPADOR ANGULAR.....	107
FIG 50 ESTUDIO DE UN REFLECTOR CON MORFOLOGÍA CILÍNDRICA MEDIANTE UN PALPADOR ANGULAR (PERPENDICULAR AL PLANO)	108
FIG 51 ESTUDIO DE UN REFLECTOR CON MORFOLOGÍA ESFÉRICA MEDIANTE UN PALPADOR ANGULAR	109
FIG 52 ALTURA RELATIVA DE ECO PARA UNA GRIETA Y UNA CAVIDAD.	111
FIG 53 DIAGRAMA DE BLOQUES GENERAL.....	113
FIG 54 COMPONENTES DEL MONTAJE.....	114
FIG 55 PALPADOR DE HAZ ANGULAR C543-SM	115
FIG 56 DIMENSIONES DEL TRANSDUCTOR.....	116
FIG 57 CABLE MICRODOT-BNC	117
FIG 58 FUENTE DE POTENCIA 1:1	118
FIG 59 ACONDICIONAMIENTO SEÑAL HACIA EL SENSOR.....	118
FIG 60 ACONDICIONAMIENTO TOTAL	119

FIG 61 ACONDICIONAMIENTO.....	119
FIG 62 PLACA ELECTRÓNICA DE ACONDICIONAMIENTO	120
FIG 63 ESQUEMÁTICO DEL ACONDICIONAMIENTO	120
FIG 64 PLACA ELECTRONICA DE POTENCIA	121
FIG 65 ESQUEMATICO DE LA FUENTE DE POTENCIA.....	121
FIG 66 TARJETA NI USB-6216.....	122
FIG 67 PESTAÑA1: PRESENTACIÓN.....	124
FIG 68 PESTAÑA 3: SOFTWARE	125
FIG 69 PROPIEDADES EN MATERIALES.....	127
FIG 70 CICLO GENERACIÓN DE PULSOS.....	128
FIG 71 CICLO LECTURA DE DATOS.	128
FIG 72 CICLO CÁLCULO DE PROPIEDADES.....	128
FIG 73 SISTEMA GENERAL DISEÑADO	129
FIG 74 TUBERÍA DE ACERO DE GRANO FINO	130
FIG 75 DISTRIBUCIÓN PARA LA TOMA DE DATOS	131
FIG 76 DISTRIBUCIÓN DE LOS ANILLOS	131
FIG 77 MUESTREO DE DATOS EN PRESENTACIÓN A-SCAN	132
FIG 78 TRENES DE PULSOS.....	134
FIG 79 PIC 18F47J53 FRECUENCIA 5 MHZ	135
FIG 80 ECOS AMPLIFICADOS PRODUCIDO POR EL TRANSDUCTOR SIN CONTACTO CON LA SUPERFICIE.	135
FIG 81 ECOS AMPLIFICADOS PRODUCIDO POR EL TRANSDUCTOR EN CONTACTO CON LA SUPERFICIE.....	136
FIG 82 MODO PARA LA MEDICIÓN	137
FIG 83 ANILLOS DE INSPECCIÓN	137
FIG 84 FALLAS INCIDIDAS.....	138
FIG 85 ANILLO 1 A 0°	139
FIG 86 ANILLO 2 A 45°	140
FIG 87 ANILLO 3 A 115°	140
FIG 89 ANILLO 4 A 180°	141
FIG 90 EQUIPO EPOCH XT Y ELEMENTOS UTILIZADOS	143
FIG 91 EPOCH XT ANILLO 1 A 0°	143
FIG 92 EPOCH XT ANILLO 2 A 45°	144
FIG 93 EPOCH XT ANILLO 3 A 115°	145
FIG 94 EPOCH XT ANILLO 4 A 180°	145
FIG 95 RESULTADOS GENERALES.....	147

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.....	42
Tabla 2.....	95

LISTA DE ANEXOS

Anexo A	156
Anexo B	158
Anexo C	160
Anexo D	161
Anexo F	174
Anexo G	184
Anexo H	190
Anexo I	196

RESUMEN

TÍTULO: PROTOTIPO EXPERIMENTAL PARA LA DETECCIÓN DE FALLAS POR ULTRASONIDO EN TUBERÍA METÁLICA*

AUTORES:

Carlos Alfonso López Amorocho.
Wilmer Alexander Sánchez Carvajal. **

PALABRAS CLAVES:

Mantenimiento Predictivo, disponibilidad, mantenibilidad, confiabilidad, sensor ultrasónico, LabView, monitoreo.

DESCRIPCIÓN:

Actualmente el mantenimiento ha tenido una gran evolución, y ahora se enfoca hacia el mantenimiento predictivo, donde encontramos una gran variedad de técnicas para mejorar el rendimiento de los equipos, entre estas nuestra técnica de trabajo: el ultrasonido industrial; todas con fines de aumentar la disponibilidad y mejorar la mantenibilidad en los equipos, logrando buena credibilidad en cuanto al mantenimiento en la compañía al incrementar el índice de confiabilidad.

Nuestro prototipo consta de un sensor ultrasónico de haz angular con una frecuencia máxima de operación de 5 MHz, un sistema electrónico para generación de potencia y otro para amplificación y acondicionamiento de las señales, un sistema de adquisición de datos, formado por una tarjeta National Instruments, y el software LabView, encargado de la interpretación de los datos y la interface con el usuario, además de componentes como cables, fuente y adaptadores pertinentes, con el fin de obtener la inspección requerida y poder dar un análisis eficiente de los defectos encontrados.

El trabajo de grado nos enseña y documenta lo que es el ultrasonido industrial como técnica para mantenimiento predictivo, nuestro enfoque va hacia la inspección en tubería metálica para la detección de defectos, puesto que realizar monitoreo a una tubería para transporte de fluidos o gases hace parte esencial de la seguridad e integridad de las instalaciones, del personal y del medio ambiente; obteniendo un uso eficiente y un menor costo de mantenimiento a mediano plazo.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Ing. Carlos Borrás.

ABSTRACT

TITLE: EXPERIMENTAL PROTOTYPE FOR THE DETECTION OF ULTRASONIC FLAWS IN METAL PIPES *

AUTHORS:

Carlos Alfonso López Amorocho.
Wilmer Alexánder Sánchez Carvajal. **

KEY WORDS:

Predictive maintenance, availability, maintainability, reliability, ultrasonic transducer, LabView, monitoring.

DESCRIPTION:

Nowadays, the maintenance has evolved greatly, and it now focuses on predictive maintenance, where we find a variety of techniques to improve the performance of the equipments, among these our working technique: industrial ultrasound; its purpose is to increase availability and maintainability in the equipments by achieving good credibility referring to the maintenance in the company to increase the reliability index.

Our prototype consists of an angle beam transducer with a maximum operating frequency of 5 MHz, an electronic system for power generation and one for amplification and signal conditioning a data acquisition system, comprising a National Instruments card and LabView software which is also responsible for the data interpretation and the user interface, and components such as cables, power power and appropriate adapters, in order to obtain the required inspection and to provide an efficient analysis of the defects found.

The degree work teaches the industrial ultrasound technique for predictive maintenance. Our approach goes toward the inspection in metal pipe for detection of defects, since performing monitoring a pipeline for transport of fluids or gases is an essential aspect to the security and integrity of facilities, staff and the environment, obtaining an efficient use and lower maintenance costs over the medium term.

*Degree Work.

**Physical-Mechanical Engineering Faculty.Mechanical Engineering School.Director: Eng. Carlos Borrás.

INTRODUCCIÓN

A lo largo de la historia han existido diferentes mecanismos, estrategias, etapas, procesos e instrumentos que permiten determinar la presencia, localización y severidad de discontinuidades que de alguna u otra manera podrían afectar la operatividad de piezas y partes nuevas o ya en servicio.

Para que estas verificaciones tengan un éxito se han desarrollado normas de calidad las cuales se han convertido en una variable muy importante al momento de obtener resultados que nos lleven a la más alta calidad.

Dentro de las variadas pruebas de inspección que se realizan a los diferentes artículos, materiales, herramientas, etc... se encuentran ensayos conocidos como las Pruebas Destructivas (PD) y Pruebas No Destructivas (PND).

El presente documento denominado “Prototipo Experimental Para La Detección De Fallas En Tubería Metálica” se basa en uno de los métodos usados en las Pruebas No Destructivas (PND), como lo es el Ultrasonido Industrial, en el documento también se da a forma de información el resto de métodos usados como: partículas magnéticas, líquidos penetrantes, radiografía, análisis de aceite, análisis espectral de corrientes, termografía infrarroja, análisis de vibraciones, etc.

El ultrasonido, son vibraciones mecánicas que se transmiten en el material por medio de ondas de la misma naturaleza que el sonido, con la diferencia de que la frecuencia de operación se encuentra por encima de los 20.000 (Hz). Este libro trata acerca de la técnica de ultrasonido, como método de ensayo no destructivo; la creación del prototipo experimental, sus propiedades fundamentales, la comparación de resultados entre el prototipo y equipos ya desarrollados, palpadores y generación, propagación y características, métodos y técnicas, sistemas y equipos y aplicaciones metalúrgicas.

1. MANTENIMIENTO, GENERALIDADES Y DEFINICIONES

El objetivo principal del mantenimiento es procurar a contribuir por todos los medios disponibles a reducir, en lo posible, el costo final de la operación de la planta. De ahí se deriva un objetivo técnico donde se trata de conservar en condiciones de funcionamiento seguro y eficiente todo el equipo, maquinaria y estructuras de tratamiento.

El personal de mantenimiento tiene dos puntos de vista para cumplir estos objetivos: el aspecto humano y el técnico. El evitar los accidentes previene pérdidas humanas y de grandes responsabilidades. Por el lado técnico, la maquinaria, las instalaciones y los equipos bien mantenidos no provocarán pérdidas económicas y facilitarán la producción continua y eficiente de la planta.

1.1 DEFINICIONES

Según la norma UNE-EN-13306; el mantenimiento es la combinación de todas las acciones técnicas, administrativas y de gestión, durante el ciclo de vida de un elemento, destinada a conservarlo o devolverlo a un estado en el cual pueda desarrollar la función requerida.¹

La nueva filosofía de mantenimiento determina que sólo hay dos clases o tipos de mantenimiento industrial: El mantenimiento Correctivo y el Mantenimiento Preventivo.

¹ <http://www.imanor.es/servicios.html>

1.2 EL MANTENIMIENTO CORRECTIVO

Es el mantenimiento ejecutado después del reconocimiento de una avería, y destinado a llevar un elemento a un estado en el que pueda desarrollar una función requerida. Este tipo de mantenimiento puede dividirse en dos ramas, el correctivo de urgencia y el correctivo programable. El mantenimiento correctivo de urgencia que es ejecutado después de que la avería se ha detectado, con el fin de evitar consecuencias inaceptables, tiene por objetivo la recuperación inmediata de la calidad de servicio, es decir, que ésta se sitúe dentro de los límites esperados por medio de arreglos provisionales; así solo se efectuaran los trabajos indispensables para que el equipo continúe operando normalmente.

El mantenimiento correctivo programable, se refiere a las actividades que se desarrollan en los equipos o máquinas que están proporcionando un servicio trivial y éste, aunque necesario, no es indispensable para dar una buena calidad de servicio, por lo que es mejor programar su atención, por cuestiones económicas.

1.3 EL MANTENIMIENTO PREVENTIVO

Es el mantenimiento ejecutado a intervalos predeterminados o de acuerdo con unos criterios prescritos, y destinados a reducir la probabilidad de fallo o la degradación de funcionamiento de un elemento.

Este sistema requiere un alto grado de conocimiento y una organización muy eficiente. Implica la elaboración de un plan de inspecciones para los distintos equipos de la planta, a través de una buena planificación, programación, control y ejecución de actividades, a fin de descubrir y corregir deficiencias que, posteriormente, puedan ser causa de daños más graves.

Este tipo de mantenimiento siempre es programable y existen muchos procedimientos para llevarlo a cabo.

1.4 MANTENIMIENTO PREDICTIVO

1.4.1 Generalidades. Este procedimiento de mantenimiento se define como un sistema permanente de diagnóstico que permite detectar con anticipación la posible pérdida de calidad de servicio que esté entregando un equipo. Dando así una oportunidad de realizar anticipadamente un mantenimiento preventivo, y si lo atendemos adecuadamente, no se perderá la calidad del servicio esperado.

En el mantenimiento predictivo, se evalúa el estado de los componentes mediante técnicas de seguimiento y análisis, logrando programar el mantenimiento “solo cuando sea necesario”. Consiste en el seguimiento y análisis de variables o parámetros con el fin de detectar los síntomas con que la máquina nos está advirtiendo y que están relacionados con la condición del equipo. Existe una gran cantidad de pruebas no destructivas para su análisis, tal como análisis de aceite, análisis de desgaste de partículas, análisis de vibraciones, termografía, ultrasonido entre otras. El estudio de estos parámetros nos suministra valiosa información del estado de sus componentes y, del modo en que está funcionando el equipo, permitiendo no solo detectar problemas de componentes sino también de diseño y de instalación.

En la industria, los equipos fallan gradualmente con un periodo de semanas o meses. Pero ofrecen numerosas señales de alerta durante el proceso, estas señales son los cambios en la temperatura, vibración o sonido, y se detectan mediante las tecnologías del mantenimiento predictivo.

La base un mantenimiento predictivo consiste en la monitorización de los equipos en funcionamiento. Sin la necesidad de realizar una parada para poder evaluar la condición de los mismos, mientras están en operación.

Estudios han demostrado que un trabajo de reparación bien planificado, normalmente toma solo la mitad del tiempo que un trabajo no planificado. El trabajo planificado siempre es más eficiente y menos costoso que el trabajo no planificado.

1.4.2 Beneficios del mantenimiento predictivo. Un buen uso del mantenimiento preventivo, y las tecnologías predictivas, eliminarán entre el 33% y el 50% de los gastos de mantenimiento que son gastados por la mayoría de las plantas. Un efectivo programa de mantenimiento predictivo entra a generar ahorros en las siguientes áreas:

1. Eliminación de las paradas no programadas causadas por fallos en los equipos o sistemas. Logrando reducciones desde el 40% en dos años hasta un 90% en cinco años.
2. Aumento en la mano de obra. Al tener claridad en la tarea de reparación necesaria para corregir las deficiencias de la planta, y apoyo necesario para rectificar el problema, el mantenimiento predictivo puede aumentar drásticamente el tiempo de trabajo efectivo. Un gran número de empresas han alcanzado a mantener entre un 75% y un 85% de utilización eficaz.
3. El mayor beneficio de un programa de mantenimiento preventivo/predictivo eficaz es un aumento en el rendimiento o capacidad de producción de la planta. A corto plazo, (de 1 a 3 años), normalmente estos aumentos los encontramos en un rango entre un 15% y 40%; pero con un buen programa las mejoras llegan al 75% y 80%.
4. Al aplicar un plan de mantenimiento predictivo eficaz los gastos aumentarían durante el primer año, aunque este aumento es mínimo con los beneficios obtenidos: como la mano de obra y el costo de materiales se estima entre un 35% y 60% esta reducción.
5. La detección de problemas incipientes en las condiciones de funcionamiento óptimo antes del daño de los equipos, generan mayor vida útil del equipo.

Haciendo pequeños ajustes o reparaciones, y no permitiendo que una deficiencia menor se convierta en un problema grave, se puede extender la vida útil efectiva casi indefinidamente.

6. Los tiempos de reparación disminuyen hasta un 60%.

7. Se obtendrá una reducción en el inventario de piezas de repuesto.

8. Se incrementa la disponibilidad de los equipos hasta en un 30%

2. INTRODUCCIÓN A LAS PRUEBAS NO DESTRUCTIVAS (PND)

Los ensayos no destructivos END o pruebas no destructivas PND, (en inglés NDT - Non Destructive Testing), es una rama de la ingeniería que se desarrolla rápidamente, debido a sus excelentes resultados.

Las técnicas como la digitalización de imágenes, la radiografía por neutrones, el electromagnetismo o la emisión acústica, que eran relativamente desconocidas hasta hace pocos años, se han convertido en herramientas de uso cotidiano en las industrias que desean mantenerse en la vanguardia del mercado ofreciendo calidad en sus productos.

Estas pruebas de inspección que se realizan a los materiales pueden dividirse en dos grandes grupos, una de sus formas más usuales son:

- Pruebas no destructivas
- Pruebas destructivas

El objetivo principal de las pruebas destructivas es determinar cuantitativamente el valor de ciertas propiedades de los materiales, como resistencia mecánica, la tenacidad o la dureza. La ejecución de las pruebas destructivas involucra el daño del material, la destrucción de la probeta o la pieza empleada en la determinación correspondiente, por lo que podemos concluir que los ensayos destructivos son la aplicación de métodos físicos directos que alteran de forma permanente las propiedades físicas, mecánicas o dimensionales de un material, parte o componente sujeto a inspección.

Este tipo de pruebas siempre ha sido necesario para comprobar si las características de un material cumplen con lo especificado durante el diseño. Debe observarse que estas pruebas no se pueden aplicar a todas las partes o componentes, ya que serían destruidos y perderían su utilidad. Sin embargo, el desarrollo de nuevas tecnologías y la optimización de los productos o los requisitos de seguridad, como es el caso de la industria aeroespacial, la nucleoelectrónica o la petroquímica, impusieron también nuevas condiciones de inspección, en las cuales se estableció la necesidad de verificar hasta en un 100% los componentes críticos; lo que planteó una severa dificultad a los departamentos de calidad, hasta que iniciaron el empleo de otras técnicas de inspección, diferentes a la visual, con las cuales se medía la integridad de los componentes sin destruirlos.

Esto fue posible al medir alguna otra propiedad física del material y que estuviera relacionada con las características críticas del componente sujeto a inspección; es decir, se inició la aplicación de las pruebas no destructivas.

Las pruebas no destructivas PND son la aplicación de métodos físicos indirectos, como es la transmisión del sonido, la opacidad al paso de la radiación, etc., y que tienen la finalidad de verificar la sanidad de las piezas examinadas. No obstante, cuando se aplica este tipo de pruebas no se busca determinar las propiedades físicas inherentes de las piezas, sino verificar su homogeneidad y continuidad. Por lo tanto, estas pruebas no sustituyen a los ensayos destructivos, sino que más bien los complementa.

Las pruebas no destructivas, como su nombre lo indica, no alteran de forma permanente las propiedades físicas, químicas, mecánicas o dimensionales de un material. Por ello no inutilizan las piezas que son sometidas a los ensayos y tampoco afectan de forma permanente las propiedades de los materiales que las

componen. De acuerdo con su aplicación, los Ensayos no Destructivos (nombre más comúnmente usado para las pruebas no destructivas) se dividen en²:

- a) Técnicas de Inspección Superficial.
- b) Técnicas de Inspección Volumétrica.
- c) Técnicas de Inspección de la Integridad o hermeticidad

2.1 MÉTODOS DE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS

Actualmente existe una gran variedad de técnicas, cada una de ellas tiene un campo de aplicación más o menos concreto, habiendo complementariedad entre la mayoría. A continuación se presentan algunas:

2.1.1 Análisis de Vibraciones. El análisis de vibraciones es una de las tecnologías aplicable al mantenimiento predictivo más popular. Puesto que se puede determinar una gran cantidad de defectos, en una amplia gama de máquinas con una inversión económica inicial razonable.

La vibración es uno de los indicativos más claros del estado de una máquina. Bajos niveles de vibración indican equipo en buen estado, cuando estos niveles se elevan es claro que algo comienza a estar mal.³

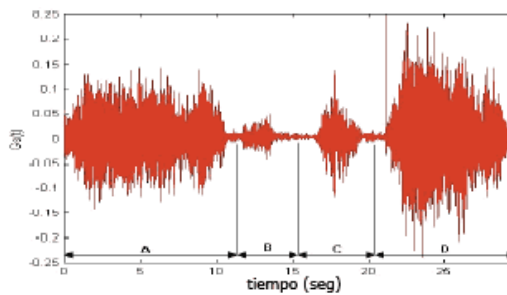
Los equipos utilizados para la adquisición de datos de vibraciones en las máquinas van desde los portátiles de campo hasta la monitorización en continuo. Existe una amplia gama y modelos de unos y otros, siendo los distribuidores y fabricantes de los mismos los que pueden orientarnos sobre las ventajas e inconvenientes de cada uno de ellos. En un primer contacto con la tecnología los

²MANUAL DE INTRODUCCIÓN AL ULTRASONIDO INDUSTRIAL, PERERA GERÓNIMO DANIEL.

³http://www.sinais.es/intro/analisis_vibraciones.html.

equipos portátiles son una buena solución para validarla. Dentro de ellos nos encontramos con “vibrómetros” que nos miden niveles de vibración globales con poca capacidad de diagnóstico, (solo indican si la vibración sube o baja, aunque vibrómetros de última generación son capaces de realizar análisis espectrales con ciertas limitaciones), y colectores de datos portátiles con un software de diagnóstico y tratamiento de datos. Estos equipos son más elevados en precios, pero tienen una capacidad de análisis importante a la hora de discernir distintos tipos de problemas en máquinas.

FIG 1 Espectro de vibración



Fuente: http://www.gmingeneria.com/productos/mantenimiento/analisis_vibraciones.html

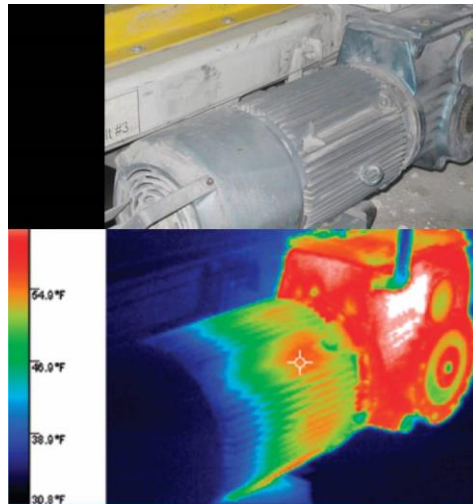
2.1.2 Termografía Infrarroja. La termografía infrarroja se puede definir como una técnica que permite, a través de la radiación infrarroja que emiten los cuerpos, la medida superficial de temperatura.

El instrumento que se usa en termografía para medir, es la cámara de infrarrojos. La principal ventaja de la medida de temperatura mediante termografía, es que es una técnica de medida, la cual no requiere contacto físico, por lo que no afectará a las condiciones de los objetos observados. Esta cualidad la hace especialmente interesante en el control y mantenimiento de elementos en tensión.

Entre las principales aplicaciones de la termografía podríamos citar:

- Medidas de espesores y detección de discontinuidades en productos aislantes.
- Térmicos y refractarios.
- Inspección de tubos y tuberías.
- Inspección en soldaduras.
- Posicionamiento de componentes y fallos en circuitos eléctricos.
- Aplicaciones en seguridad, defensa, prevención y detección de incendios.
- Aplicaciones médicas.
- Medición en tanques de almacenamiento.
- Control.

FIG 2 Termograma industrial



Fuente: Extraído de Webinar Termografía Industrial

2.1.3 Análisis de Aceites. El análisis de aceites en nuestras instalaciones tiene dos objetivos claros: Conocer el estado del aceite y conocer el estado de la máquina. Tradicionalmente éste último se obviaba, centrándonos siempre en

determinar únicamente el estado del lubricante, para lo cual se realizan una serie de ensayos rutinarios de viscosidad, acidez, basicidad, análisis de aditivos, inspecciones visuales, etc. No es este el objetivo de la analítica del aceite como técnica de mantenimiento predictivo.

Las espectrometrías, ferrográficas y contenidos de partículas aportan valiosa información del estado de los componentes de las máquinas que bañamos con nuestros lubricantes. Podemos detectar defectos con una antelación mucho mayor que con otras técnicas como podría ser el análisis de vibraciones, la dificultad estriba en el alto costo de la tecnología implicada en ello.

En casos de alta responsabilidad podría emplearse como técnica complementaria para verificar un diagnóstico realizado, por ejemplo, con un análisis de vibraciones. Por ejemplo defectos en rodamientos, cojinetes o transmisiones pueden corroborarse al encontrar partículas de los mismos en un ferrograma.

FIG 3 Análisis de aceites



Fuente: Extraído de <http://www.balances-dinamicos.com/pages/aceitesnew.htm>

2.1.4 Análisis espectral de intensidades de corrientes. El análisis de motores eléctricos puede realizarse mediante termografías o mediante análisis de

vibraciones, pero otra de las técnicas que podemos emplear para detectar problemas en barras es el análisis espectral de corriente, consistente en tomar el espectro de intensidades en las fases de alimentación del motor. Esta tecnología puede realizarse en paralelo con el análisis de vibraciones, usando los mismos colectores de datos, cambiando los sensores de vibración por una pinza amperimétrica.

FIG 4Equipo para análisis espectral



Fuente: <http://www.infoepe.es/t/Supervision/3.aspx>

2.1.5 Análisis del flujo de dispersión. El espectro de flujo magnético es una técnica prometedora que ha despertado gran interés desde su aparición, hace menos de 5 años. Aunque la técnica no está demasiado probada en máquinas reales, los ensayos de laboratorio presentan resultados sorprendentes en el control de evolución de fallos de aislamiento, cortocircuitos de espiras, y otros problemas relacionados con estator y rotor.

2.1.6 Detección ultrasónica. Existen numerosos fenómenos que van acompañados de emisión acústica por encima de las frecuencias del rango audible. Las características de estos fenómenos ultrasónicos hacen posible la

utilización de detectores de ultrasonidos en infinidad de aplicaciones industriales dentro del mantenimiento.

- ✚ Detección de grietas y medición de espesores (por impulso eco)
- ✚ Detección de fugas en conducciones, válvulas, etc.
- ✚ Verificación de purgadores de vapor.
- ✚ Inspección de rodamientos.
- ✚ Control de descargas eléctricas.

Estas son algunas de las aplicaciones no habituales de los ultrasonidos, además de las normalmente usadas como ensayo no destructivo para la determinación de defectos internos en piezas.

FIG 5 Inspección mecánica con equipo de ultrasonido en bombas



Fuente: <http://confiabilidad.net/articulos/el-ultrasonido-completa-el-paquete>

3. EL SONIDO

El sonido es aquella sensación auditiva que se genera a partir de la vibración de algún objeto. Se define como la vibración mecánica de partículas en un medio. Estas vibraciones son captadas por nuestros oídos y transformadas en impulsos nerviosos que posteriormente se mandan al cerebro para su decodificación.

Cuando una onda sonora se transmite a través de un medio, las partículas vibran alrededor de un sistema de referencia fijo, a la misma frecuencia que la onda sonora. Las partículas como tal no viajan con la onda, reaccionan entre sí produciendo intercambio de energía, esto quiere decir que lo que se transmite es su energía por el medio.

Estas vibraciones generan ondas de propagación que pueden ser audibles o no, a pesar de la gran variedad de medios de propagación estas ondas tienen un comportamiento semejante.

La vibración genera una compresión en el medio en la dirección de propagación del sonido, son por tanto ondas longitudinales, este es el modo en el que el sonido se propaga.

3.1 CUALIDADES DEL SONIDO

El oído humano tiene la capacidad de diferenciar unos sonidos de otros por la gran sensibilidad que posee en distinguir las tres cualidades que caracterizan todo sonido, que son: la intensidad, el tono y el timbre. Aun cuando todas ellas se

refieren al sonido fisiológico, están relacionadas con diferentes propiedades de las ondas sonoras.

3.1.1 Intensidad. La intensidad del sonido percibido, propiedad que hace que este se capte como fuerte o como débil, está relacionada con la intensidad de la onda sonora correspondiente, también llamada intensidad acústica,. La intensidad acústica es una magnitud que da idea de la cantidad de Energía que está fluyendo por el medio como consecuencia de la propagación de la onda.

Se define como la energía que atraviesa por segundo una superficie dispuesta perpendicularmente a la dirección de propagación. Equivale a una potencia por unidad de superficie y se expresa en W/m^2 . La intensidad de una onda sonora es proporcional al cuadrado de su frecuencia y al cuadrado de su amplitud y disminuye con la distancia al foco.

La magnitud de la sensación sonora depende de la intensidad acústica, pero también depende de la sensibilidad del sonido. El intervalo de intensidades acústica que va desde el umbral de audibilidad, o valor mínimo perceptible, hasta el umbral del dolor.

La intensidad fisiológica o la sensación sonora se mide en decibelios (dB). Por ejemplo, el umbral de la audición esta en 0 dB, la intensidad fisiológica de un susurro corresponde a unos 10 dB y el ruido de las olas en la costa a unos 40 dB. La escala de sensación sonora es logarítmica, lo que significa que un aumento de 10 dB corresponde a una intensidad 10 veces mayor, por ejemplo el ruido de las olas en la costa es 1000 veces más intenso que un susurro, lo que equivale a un aumento de 30 dB.

Debido a la extensión de este intervalo de audibilidad, para expresar las intensidades sonoras se emplea una escala cuyas divisiones son potencia de diez y cuya unidad de medida es el decibelio dB.

La conversión entre intensidad y decibelios se puede realizar mediante esta ecuación:

$$s = 10 * \log \frac{I}{I_0}$$

Donde $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$ y corresponde a un nivel de 0 dB. El umbral del dolor corresponde a una intensidad de 1 W/m^2 o 120 dB.

Eso significa que una intensidad acústica de 10 dB corresponde a una energía diez veces mayor que una intensidad de 0 dB; una intensidad de 20 dB representa una energía 100 veces mayor que la correspondiente a 0 dB y así sucesivamente.

3.1.2 Tono. El tono es una característica del sonido por la cual el oído asigna un lugar en la escala musical, lo que permite distinguir entre los graves y agudos. Su magnitud física se encuentra asociada a la frecuencia. Los sonidos graves corresponden a frecuencias bajas, mientras que los agudos son debidos a frecuencias altas. Por ejemplo el sonido más grave de una guitarra corresponde a una frecuencia de 82,4 Hz y el más agudo a 698,5 Hz.

Todas las ondas sonoras no son perceptibles por el oído humano, debido a que el oído solo percibe ondas que tengan frecuencias entre los 20 y 20.000 Hz. En el aire dichos valores corresponden a longitudes de ondas que van desde 16 metros hasta 1,6 centímetros.

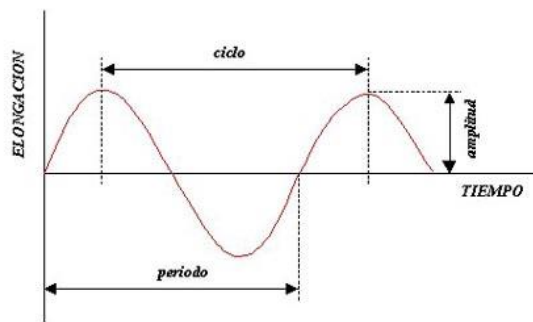
3.1.3 Timbre. El timbre es una característica del sonido que permite diferenciar los sonidos de diferentes instrumentos aun cuando su intensidad y tono sean la misma, gracias a esta cualidad tan importante es posible conocer a una persona por su voz.

3.2 CUALIDADES DE UNA ONDA SONORA

Si hablamos de sonido, se debe tener presente que se está hablando de vibración.

Una onda sonora se puede representar de la siguiente forma.

FIG 6 Relación entre amplitud y longitud de onda.



Fuente: Google

Las ondas sonoras poseen cuatro características principales.

- ✚ Periodo
- ✚ Frecuencia
- ✚ Amplitud
- ✚ Longitud de onda

3.2.1 Periodo. Es el tiempo que se toma una partícula en cumplir un ciclo o un evento.

3.2.2 Frecuencia. Es la cantidad de ciclos, oscilaciones o eventos que una partícula realiza en un segundo.

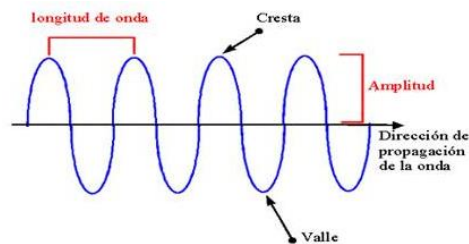
Podemos ver que existe una relación entre el periodo y la frecuencia.

$$f = \frac{1}{T}$$

3.2.3 Amplitud. Es el desplazamiento máximo que tiene una partícula que se encuentra sometida a vibración respecto a un punto de referencia.

3.2.4 Longitud de onda. Esta característica nos describe que tan larga es la onda. La longitud de onda se define como como la distancia existente entre dos crestas o valles consecutivos.

FIG 7 Longitud de onda



Fuente : Autores

La frecuencia y la longitud de onda están relacionadas entre sí mediante la siguiente ecuación:

$$\lambda = c/f$$

Donde ; λ = longitud de onda, f = Frecuencia, c = velocidad de la onda

3.3 VELOCIDAD DEL SONIDO

La propagación del sonido involucra el transporte de energía, en forma de ondas mecánicas que se propagan a través de la materia sólida, líquida o gaseosa. Como las vibraciones se producen en la misma dirección en la que se propaga el sonido, se trata de una onda longitudinal.

Ciertas características de los fluidos y de los sólidos influyen en la onda del sonido. Es por eso que los sonidos en los sólidos y en los líquidos se propagan con mayor rapidez que los gases. En general cuanto mayor sea la compresibilidad ($1/k$) del medio menor es la velocidad del sonido.

La densidad juega un papel importante en la velocidad del sonido, en general entre mayor sea la densidad (ρ), menor será la velocidad de propagación.

Podemos obtener una relación de la velocidad con estas dos características mediante la siguiente ecuación:

$$v \propto \sqrt{\frac{K}{\rho}}$$

En los gases, la temperatura influye tanto la compresibilidad como la densidad, de tal manera que el factor de importancia suele ser la temperatura misma.

En la siguiente tabla se observan las diferentes velocidades del sonido.

Tabla 1 Velocidades del sonido

MEDIO	TEMPERATURA (C°)	VELOCIDAD (m/s)
Aire	0	331,46
Argón	0	319
Bióxido de Carbono	0	260,3
Hidrógeno	0	1286
Helio	0	970
Nitrógeno	0	333,64
Oxígeno	0	314,84
Agua destilada	20	1484
Agua de mar	15	1509,7
Mercurio	20	1451
Aluminio	17-25	6400
Vidrio	17-25	5260
Oro	17-25	3240
Hierro	17-25	5930
Plomo	17-25	2400
Plata	17-25	3700
Acero inoxidable	17-25	5740

Fuente: http://www.quimicaweb.net/grupo_trabajo_ccnn_2/tema4/index.htm

3.4 ONDAS ESTACIONARIAS

Una onda estacionaria se puede considerar como la interferencia de dos ondas de la misma amplitud y longitud de onda.

Una onda incidente que se propaga de izquierda a derecha y otra que es el resultado de la reflexión en el extremo y se propaga de derecha a izquierda.

$$y_1 = A * \text{sen}(kx - \omega t); \text{ de izquierda a derecha}$$

$$y_2 = A * \text{sen}(kx + \omega t); \text{ de derecha a izquierda}$$

La onda estacionaria resultante es la suma de las dos.

3.5 VELOCIDAD ACÚSTICA

La velocidad acústica no es nada más que la velocidad de propagación del sonido en el medio.

La velocidad acústica longitudinal es diferente para cada medio de propagación y es directamente proporcional a la densidad y al Módulo de elasticidad, e inversamente proporcional al Coeficiente de Poisson.

La velocidad acústica transversal, es diferente para cada medio, es la raíz cuadrada del producto del Módulo de Rigidez entre la densidad del material de propagación. La velocidad acústica también se puede obtener mediante el coeficiente de Poisson y el Modulo de Elasticidad.

La velocidad acústica es característica propia de cada material, y es constante para cada material. Se puede tomar contante pues dicha velocidad depende especialmente en los gases y líquidos de la presión, de la temperatura y otros parámetros, por tanto en materiales sólidos como los metales esta influencia se podría llegar a despreciar y por consiguiente tomar esta velocidad como una contante algo muy útil para la realización de los ensayos de ultrasonido.

Esta es una característica de cada material y se puede calcular a partir de sus características físicas ya que es proporcional a la elasticidad del medio e inversamente proporcional a su densidad.

E =Modulo de elasticidad (N/m^2)

μ =Coeficiente de Poisson (adimensional)

ρ =Densidad (Kg/m^3)

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)}$$
 Modulo de elasticidad transversal (N/m^2)

3.6 PRESIÓN ACÚSTICA

La presión acústica se define como la fuerza en dirección normal por unidad de superficie (N/m^2).

Nivel de presión sonora o nivel de sonido es una medida logarítmica de la presión acústica eficaz de un sonido en relación con el valor de referencia.

Un medidor microscópico de presión, colocado en el campo de la onda elástica, indicara alternativamente presiones altas y presiones bajas según una secuencia periódica. Esta presión alterna es la presión acústica. Ocurre no solo en gases si no en líquidos y sólidos. La amplitud de dicha presión está relacionada con la amplitud de oscilación.

3.7 INTENSIDAD ACÚSTICA

Las ondas mecánicas transportan energía, pero no masa. La intensidad acústica se define como la cantidad de energía que pasa por unidad de área en la unidad de tiempo. (W/m^2)

$$I = \frac{p^2}{2Z}$$

4. ULTRASONIDO

A través de los siglos, el hombre ha intentado utilizar el sonido para evaluar la robustez o calidad de materiales, golpeando las piezas mediante algún instrumento como o desafilado, y escuchando las diferencias de tono, que puedan evidenciar la presencia de discontinuidades. Esta forma de ensayo se considera la precursora de lo que conocemos hoy en día, como ultrasonido.

Las investigaciones sobre la utilización del sonido en la detección de defectos, tomaron muchos años; sin embargo, fue solo en los años 30, cuando se presentó la posibilidad de usar la energía ultrasónica como método de ensayo no destructivo. Investigaciones en Alemania, O. Muhihauser, A. Trost y R. Pohiman; y en Rusia, S. Sokoloff desarrollaron métodos de ensayo ultrasónico mediante los cuales podrían ser determinadas discontinuidades de gran tamaño. Estos métodos presentaron algunas limitaciones, la principal fue el hecho de que las superficies superior e inferior del material bajo ensayo debían ser accesibles. Fueron realizados muchos intentos para obtener un método de ensayo que requiera acceso a una sola superficie, esto fue logrado a mediados del año 1.940. Al mismo tiempo, Fred A. Fierestone, en la Universidad de Michigan Estado Unidos, invento un instrumento que utilizaba pulsos de energía ultrasónica para obtener reflexiones de discontinuidades diminutas. Durante el mismo periodo, D. O. Sproule, en Inglaterra, desarrollo otros aparatos de ensayo. Estos primeros instrumentos fueron considerados, en su mayor parte, como equipos de ensayo en laboratorio y utilizados para investigaciones metalúrgicas.⁴

⁴Curso Básico de Ultrasonido, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela.

En años recientes, los avances de la instrumentación y la tecnología electrónica, han suplido las herramientas necesarias para hacer posible el desarrollo de la técnica ultrasónica, tal y como la conocemos hoy en día. El ultrasonido es un confiable y rápido instrumento de aseguramiento y control de calidad.

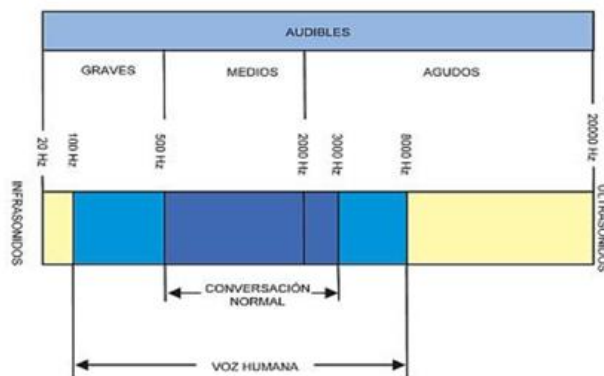
Gracias a las cualidades básicas, los ensayos de ultrasonido se utilizan en elementos metálicos y no metálicos, tales como: soldaduras, fundiciones, planchas, tubos, plásticos, cerámicas, etc.

Este ensayo es aplicable en detectar discontinuidades subsuperficiales, siendo una de las herramientas más efectivas existentes, que me permiten y garantizan un buen aseguramiento y control de calidad.

El ultrasonido es el nombre dado a sonidos presentes en un rango de frecuencias superiores a las percibidas por el oído humano. Las ondas sonoras pueden ser divididas en tres grandes grupos como le ilustro en la fig. 17; Infrasonicas, donde su rango de frecuencias es menor a los 16 Hz, Sónica, donde las frecuencias se localizan entre los 16 Hz y 20.000 Hz y Ultrasónica, donde las frecuencias son mayores a 20.000 Hz, sin embargo cabe resaltar que la frecuencia lograda hasta el presente es del orden de 1.000.000.000 Hz. El rango de frecuencias logrado en ultrasonido abarca los 200.000 hasta los 25.000.000 Hz.

En la siguiente figura se puede visualizar los rangos en los que se ubican los diferentes sonidos.

FIG 8 Rango de frecuencias



Fuente : “La Aplicación del Ultrasonido como Tecnología Complementaria en un Plan de Mantenimiento Predictivo” – José Antonio Pedrouzo Tello.

Estas pruebas se basan en el censado de sonidos a altas frecuencias. Una gama de equipos de monitoreo pueden captar frecuencias superiores a los 20 KHz, frecuencias que se encuentran por encima del rango promedio del oído humano que es de 16 KHz.

Las características que presentan las diferentes longitudes de onda, me permite ver porque el ultrasonido es ideal para el monitoreo de condición. Las emisiones de sonidos a altas frecuencias son más localizables, recorren distancias cortas y su intensidad de volumen es baja.

Las principales ventajas de este método son:

- ✓ Elevada sensibilidad de detección, dependiendo de la frecuencia que se utilice, la velocidad del sonido en el material y el tipo de onda.
- ✓ Depende poco de la geometría de la pieza.
- ✓ No solo se puede inspeccionar el material en la superficie, también volumétricamente, en este proceso podemos lograr distancia de penetración de 100 mm.
- ✓ Rapidez de la inspección y resultado inmediato.

- ✓ Utilización de aparatos manuales y de poco peso.
- ✓ Pocos gastos en materiales de consumo y energía eléctrica
- ✓ Bajo riesgo para el operador y personal circundante.
- ✓ Por trabajar en un rango de frecuencias alto las ondas ultrasónicas no se propagan fácilmente en el aire.

Limitaciones del método son:

- ✓ Pueden existir limitaciones en su uso ya sea por las características del material, las condiciones de la superficie, la geometría, etc.
- ✓ Discontinuidades sub-superficiales no pueden ser detectadas.

Aplicaciones

La inspección ultrasónica se basa en un fenómeno mecánico, se puede adaptar para determinar la integridad estructural de los materiales de ingeniería.

Sus principales aplicaciones consisten en:

- ✓ Detección y caracterización de discontinuidades.
- ✓ Medición de espesores, extensiones y grado de corrosión.
- ✓ Definir características de enlace (uniones).
- ✓ Determinación de las características físicas, tales como: estructura metalúrgica, tamaño de grano y constantes elásticas.

4.1 MODO DE PROPAGACIÓN DE LAS ONDAS ULTRASÓNICAS

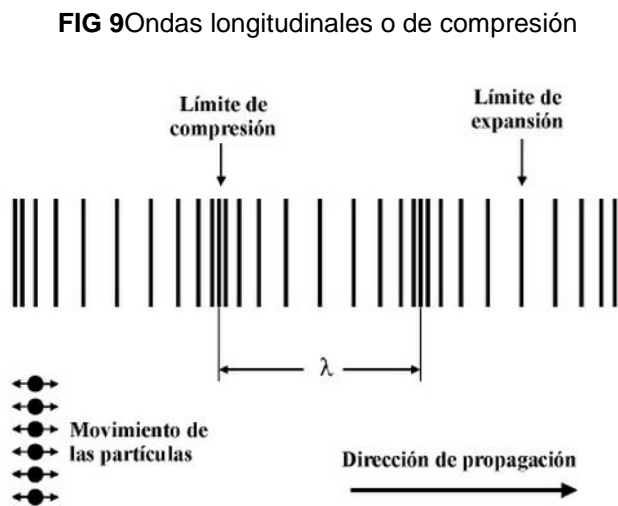
La energía ultrasónica se propaga en un material por medio de la vibración de sus partículas, se trasmite de un lado a otro.

La dirección en que vibran las ondas con respecto a la dirección en que se propagan la onda ultrasónica hace la existencia de varios tipos de onda. Los modos de vibración de onda son:

- Ondas Longitudinales o de Compresión.
- Ondas de Transversales o de Cizalladura.
- Ondas Superficiales o de Rayleigh.
- Ondas de Lamb o de Placa.

En la inspección por ultrasonido, los modos de onda más frecuentemente utilizados son: las ondas longitudinales o de compresión y de corte o cizalladura.

4.1.1 Ondas Longitudinales o de Compresión.



Fuente: <http://es.scribd.com/doc/58206784/70/Impedancia-acustica>

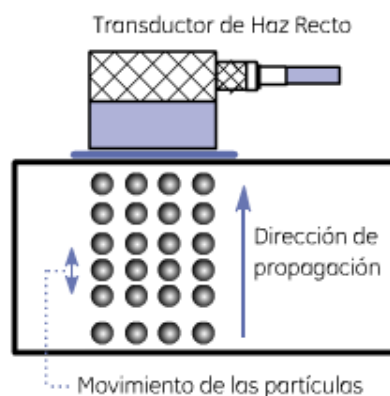
Este tipo de onda posee una característica principal y es que las partículas vibren en dirección paralela con respecto a la dirección de propagación de la onda ultrasónica. Estas también llamadas ondas de compresión, debido a que existen zonas donde las partículas están muy cerca y otra zona donde existen zonas dilatadas donde las partículas están muy separadas.

La propagación de este tipo de onda se da gracias a la relación existente entre la elasticidad de cada partícula, una de ellas vibra y transmite su energía en hacia las partículas vecinas y así sucesivamente.

Esta forma de propagación es la más usada para ensayos de ultrasonido, gracias a la facilidad para generarlas, detectarlas y debido también a que son las únicas que pueden ser propagadas en materiales sólidos, líquidos y gaseosos.

Cuando se utiliza este modo de vibración en la inspección por ultrasonido, se identifica comúnmente con el término de “Haz Recto”.

FIG 10 Generación de Ondas longitudinales



Fuente: Llog S.A de C.V.

Se puede calcular la velocidad acústica de propagación para ondas longitudinales mediante la siguiente ecuación:

$${}^5V_l = \sqrt{\frac{E * (1 - u)}{\rho * (1 + u) * (1 - 2u)}}$$

Dónde:

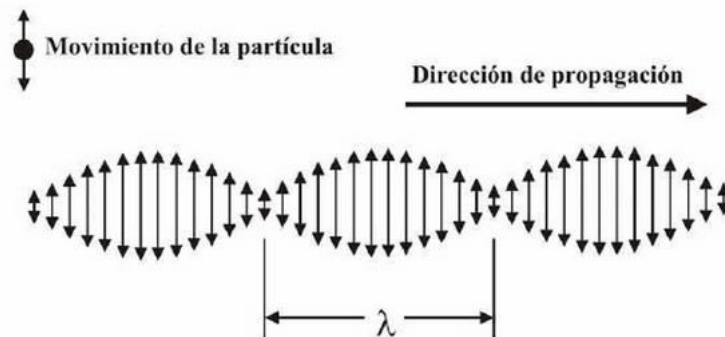
V_l = Velocidad acústica de las ondas longitudinales

E = Modulo de Elasticidad

ρ = Densidad

4.1.2 Ondas Transversales o de Cizalladura.

FIG 11 Ondas transversales o de cizalladura



Fuente: <http://es.scribd.com/doc/58206784/70/Impedancia-acustica>

Este tipo de ondas se caracterizan por que las partículas vibran en dirección perpendicular a la dirección de propagación de la onda ultrasónica.

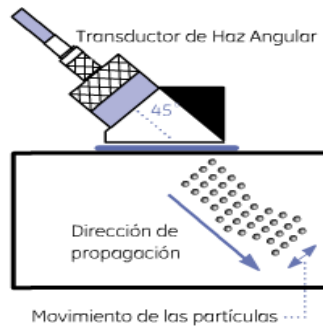
⁵Curso Básico de Ultrasonido, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela.

La distancia entre dos posiciones mínimas o dos máximas sucesivas es constante y corresponde a la longitud de onda. Son conocidas como “ondas transversales”.

Un aspecto importante para tener en cuenta es que su velocidad es de aproximadamente la mitad de la velocidad de las ondas longitudinales para un mismo material. Solo se pueden propagar en sólidos debido a que su modulo de rigidez es igual a cero a excepción de ciertos fluidos con viscosidades altas.

El transductor de haz angular consiste en un transductor montado en una zapata, para que la onda entre a la pieza a un cierto ángulo, se identifica comúnmente con el término de “Haz Angular”.

FIG 12 Generación de Ondas de corte



Fuente: Llog S.A de C.V.

Se puede calcular la velocidad de propagación para ondas transversales mediante la siguiente ecuación:

$${}^6V_T = \sqrt{\frac{E * 1}{\rho * 2(1 + u)}}$$

⁶Curso Básico de Ultrasonido, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela.

Se puede simplificar en:

$${}^7V_l = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

Dónde:

V_T = Velocidad acústica de las ondas transversales

G = Modulo de rigidez

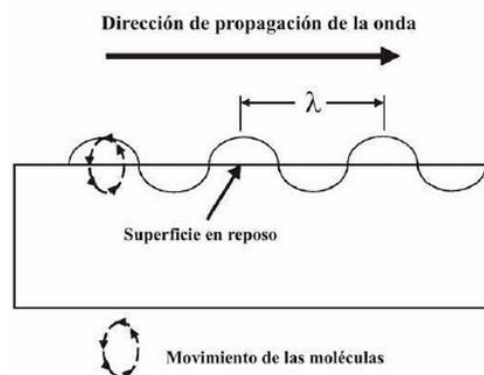
Es importante resaltar que las velocidades acústicas de las ondas longitudinales y transversales se relacionan de la siguiente manera:

$${}^8V_T = \frac{5}{9} * V_L$$

De esta ecuación se deduce que la longitud de onda de las ondas transversales es menor en comparación a las ondas longitudinales a una misma frecuencia. Esto trae como consecuencia que las ondas de corte sean más sensibles a deflectores y por ende su dispersión en el material sea más fácil.

4.1.3 Ondas Superficiales o de Rayleigh.

FIG 13 Ondas superficiales o de Rayleigh



⁷Curso Básico de Ultrasonido, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela.

⁸Curso Básico de Ultrasonido, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela.

Estas ondas originan que las partículas de la superficie o próximas a ella vibren de forma elíptica. De alguna forma se asemejan a las olas en el agua.

Su energía cae rápidamente debajo de la superficie hasta que a una longitud de onda aproximadamente de profundidad las partículas prácticamente se encuentran en reposo. Son también conocidas como “Ondas de Rayleigh”, su velocidad es de aproximadamente el 90% de la velocidad de las ondas de corte y se propagan únicamente a través del borde o superficie libre de sólidos.

Este tipo de ondas son adecuadas para detectar fallas o discontinuidades superficiales.

FIG 14 Generación de Ondas superficiales



Fuente: Llog S.A de C.V.

Se puede calcular la velocidad de propagación para ondas transversales mediante la siguiente ecuación:

$${}^9V_s = \frac{0,87 + 1,12 * u}{1 + u} \sqrt{\frac{E * 1}{\rho * 2(1 + u)}}$$

Dónde:

V_s =Velocidad acústica de las ondas superficiales

Se pueden obtener relaciones entre las velocidades superficiales, velocidades longitudinales y velocidades transversales mediante las siguientes ecuaciones:

$${}^{10}V_s = \frac{55}{108} * V_l \qquad {}^{11}V_s = \frac{11}{12} * V_t$$

Estas ecuaciones fueron propuestas por Lord Rayleigh en 1880, las cuales al día de hoy son de gran importancia en estudios de movimientos telúricos y sísmológicos. Se debe aclarar que este tipo de ondas solo pueden propagarse en medios sólidos.

4.1.4 Ondas de Lamb. Este tipo de ondas es similar a las ondas de propagación superficial, a diferencia que estas se propagan a lo largo de piezas con espesores menores a una longitud de onda (placas y/o láminas). Un ejemplo donde podría presentarse este tipo de onda sería en un plaqueado o recubrimiento superficial. La velocidad de propagación de este tipo de ondas no solo depende de las características del material, sino también del espesor, de la frecuencia de onda, y el tipo de onda. Existen dos clases de ondas Lamb en cuanto al sentido de propagación de las partículas:

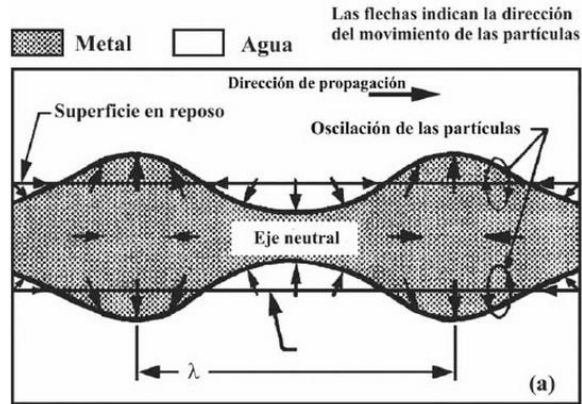
⁹Curso Básico de Ultrasonido, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela.

¹⁰Curso Básico de Ultrasonido, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela.

¹¹Curso Básico de Ultrasonido, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela.

- Ondas Simétricas o de dilatación

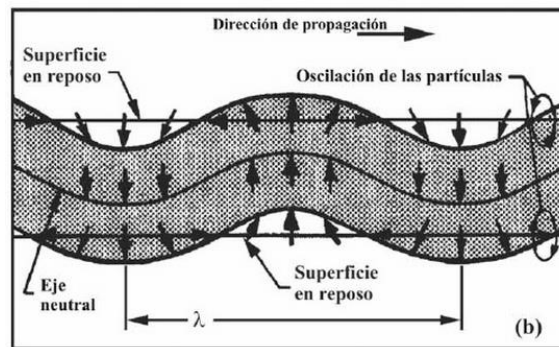
FIG 15 Ondas simétricas o de dilatación



Fuente: <http://es.scribd.com/doc/58206784/70/Impedancia-acustica>

- Ondas Asimétricas o de deflexión.

FIG 16 Ondas asimétricas o de deflexión



Fuente: <http://es.scribd.com/doc/58206784/70/Impedancia-acustica>

4.2 IMPEDANCIA DE LA ONDA ACÚSTICA

La impedancia acústica es una característica del medio que atraviesa la onda sonora. Relaciona la velocidad que la partícula adquiere en el momento de su vibración y la presión a la que se encuentra sometida. La impedancia es la resistencia que presenta un material a la vibración de sus partículas esta característica da idea de la facilidad que un determinado medio ofrece al paso de sonidos a través de él.

La impedancia de la onda acústica se define mediante la siguiente ecuación:

$$Z = \rho * v$$

Dónde:

Z = Impedancia acústica.

V= Velocidad acústica.

ρ = Densidad.

La impedancia de la onda acústica también puede definirse mediante la siguiente ecuación:

$$Z = \frac{P}{V}$$

Dónde:

V = Velocidad instantánea de vibración de la partícula.

4.3 INTERCAMBIO DE ENERGÍA DE UN MEDIO A OTRO

La ley de la conservación de la energía, es el primer principio de la termodinámica, este afirma que la cantidad total de energía en cualquier sistema físico aislado (sin interacción con ningún otro sistema) permanece invariable en el tiempo, pero dicha energía puede transformarse en otro tipo de energía. Resumiendo lo dicho anteriormente podemos afirmar que la energía no se crea ni se destruye solo cambia de una forma a otra.

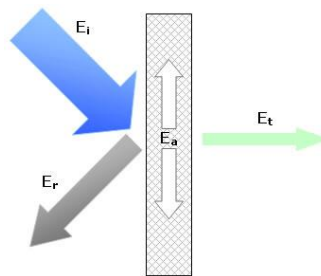
Haciendo referencia a la propagación de una onda, esta posee una característica importante y es que una onda transfiere energía y no masa.

Para el caso de transporte de energía en ondas de ultrasonido se debe tener claro que los medios para dicha transferencia de hacen en interfaces sólido/sólido y líquido sólido o viceversa.

De estudios anteriores se sabe que la energía incidente en un medio no es posible transmitirla completamente, por tanto parte de la energía incidida se transmite y otra parte se refleja a través de la superficie límite del cuerpo.

De lo siguiente podemos concluir que la energía incidida (E_i) es la suma de la energía trasmitida (absorbida E_a) más la suma de la energía reflejada (E_r).

FIG 17 Transferencia de energía en una superficie



$$E_i = E_a + E_r$$

Fuente: Imágenes Google

Definida anteriormente la impedancia y la forma como se transmite la energía en la frontera de un material podemos obtener y cuantificar la energía transmitida y reflejada a través de las siguientes ecuaciones.

$$\% \text{ de energía transmitida} \quad E_t = \frac{4*Z_1*Z_2}{(Z_1+Z_2)^2} * 100$$

$$\% \text{ de energía reflejada} \quad E_t = \left[\frac{Z_1-Z_2}{Z_1+Z_2} \right]^2 * 100$$

Las impedancias acústicas Z_1 y Z_2 se calculan mediante las ecuaciones descritas en el capítulo 4.2 o se pueden obtener dichos valores y otros en las tablas adjuntas en los Anexos. Se debe aclarar que el uso de estas ecuaciones son validas para situaciones donde la onda ya sea longitudinal o transversal irradian a la superficie de forma normal a la superficie del material.

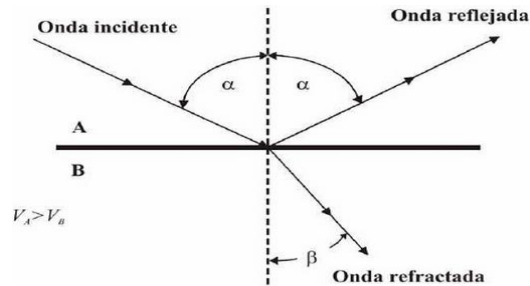
4.4 INCIDENCIA ANGULAR

En el capítulo anterior se mostró el cálculo de impedancia y la proporción de la energía transmitida y reflejada en ondas que inciden de forma perpendicular a la superficie, en esta sección veremos cómo es el comportamiento para ondas que inciden de manera oblicua a la superficie.

La onda reflejada tiene la misma velocidad V_a , e igual ángulo α , que la onda incidente; mientras que la onda refractada posee una velocidad V_b y el ángulo de refracción β , está definido por la ley de Snell.

$$\frac{\text{sen}(\alpha)}{\text{sen}(\beta)} = \frac{V_a}{V_b}$$

FIG 18 Comportamiento de una onda reflejada y refractada en el material



Fuente: <http://es.scribd.com/doc/58206784/70/Impedancia-acustica>

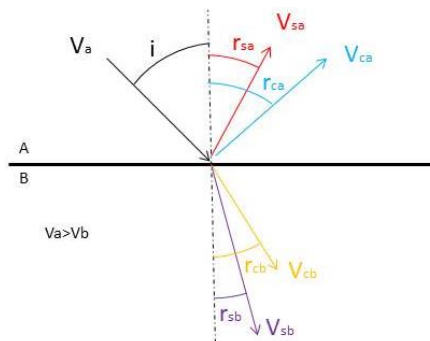
4.5 MODOS DE ONDA Y SU RELACIÓN

Cuando un rayo incide en una superficie resultan ondas reflejadas y refractadas y estas a su vez pueden cambiar de modo; es decir pasar de onda longitudinal a transversal y viceversa, dependiendo de la velocidad de incidencia el tipo de material y el ángulo de incidencia.

Para poder analizar la conversión de modos podemos separar varios casos, que a continuación se describen.

4.5.1 Onda Incidente de Compresión o Longitud.

FIG 19 Onda reflejada y refractada de una onda sonora incidente de compresión en un material



Fuente: Autores

En la figura 26 se ilustra una onda incidente con velocidad V_a y un ángulo de incidencia i , respecto a la perpendicular del plano de interface. En el caso que la velocidad V_a sea mayor que la velocidad V_b ($V_a > V_b$) el resultado obtenido son cuatro diferentes tipos de ondas acústicas.

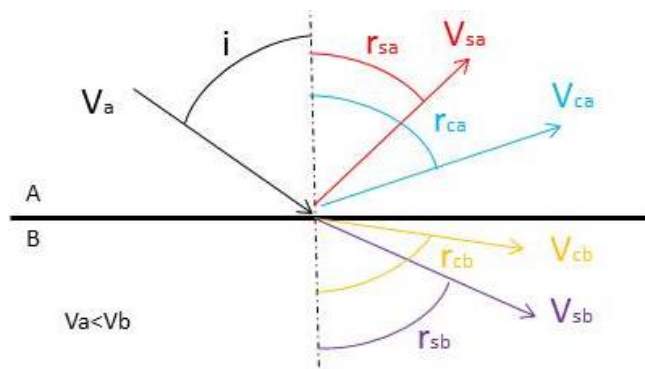
- Onda de compresión reflejada que viaja a una velocidad V_{ca} con un ángulo de reflexión $r_c = i$.
- Onda cortante reflejada que viaja a una velocidad V_{sa} con un ángulo de reflexión r_s .
- Onda de compresión refractada que viaja a una velocidad V_{cb} y ángulo de transmisión r_c .
- Onda cortante refractada con velocidad V_{sb} y ángulo r_s .

Aplicando la ley de Snell para las cuatro ondas descritas se obtiene las siguientes relaciones:

$$\frac{\text{sen}(i)}{V_{ca}} = \frac{\text{sen}(r_s)}{V_{sa}} = \frac{\text{sen}(r_c)}{V_{cb}} = \frac{\text{sen}(r_s)}{V_{sb}} = \frac{\text{sen}(r_c)}{V_{cb}}$$

4.5.2 Onda Incidente Cortante o Transversal.

FIG 20 Onda reflejada y refractada de una onda sonora incidente de cortante en un material



Fuente: Autores

De manera similar a la anterior en la figura 27 se ilustra una onda incidente con velocidad V_a y un ángulo de incidencia i , respecto a la perpendicular del plano de interface. En el caso que la velocidad V_a sea menor que la velocidad V_b ($V_a < V_b$) el resultado obtenido son las mismas cuatro ondas acústicas.

Aplicando la ley de Snell para los cuatro tipos de ondas descritas en la sección anterior e ilustradas en la figura se obtienen las siguientes relaciones:

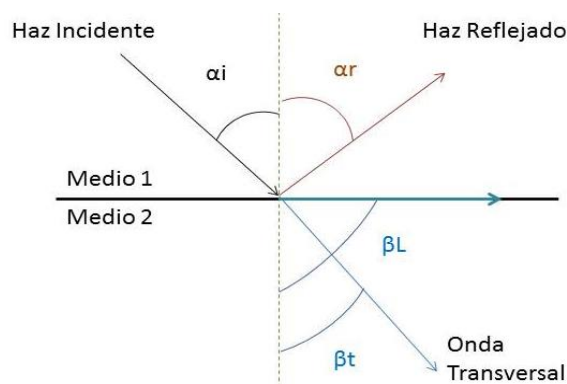
$$\frac{\text{sen}(i)}{V_{ca}} = \frac{\text{sen}(r_c)}{V_{ca}} = \frac{\text{sen}(r_s)}{V_{sb}} = \frac{\text{sen}(r_c)}{V_{cb}}$$

4.6 ÁNGULOS CRÍTICOS

Se denominan ángulos críticos, aquellos ángulos que producen la onda longitudinal refractada (Primer ángulo crítico) y la onda transversal refractada (Segundo ángulo crítico) en su superficie.

4.6.1 Primer Ángulo Crítico.

FIG 21 Primer ángulo crítico



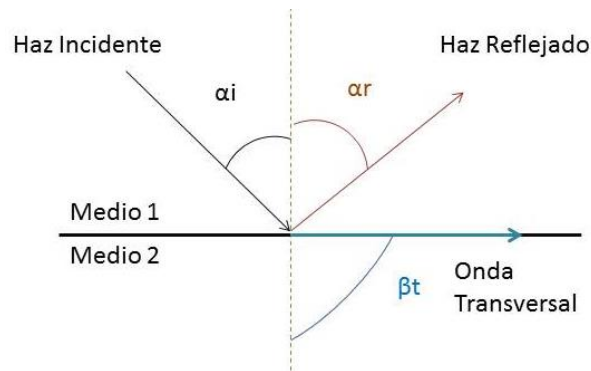
Fuente: Autores

El primer ángulo crítico es aquel ángulo de incidencia (α_i) para el cual el ángulo de refracción del haz longitudinal (β_L), sea igual a 90° .

A medida que el ángulo de incidencia aumente automáticamente los valores de los ángulos de reflexión y refracción aumentaran según la ley de Snell hasta que el haz longitudinal se propague en la superficie límite.

4.6.2 Segundo Ángulo Crítico.

FIG 22 Segundo ángulo crítico



Fuente: Autores

El segundo ángulo crítico es aquel ángulo de incidencia (α_i) para el cual el ángulo de refracción del haz transversal (β_t) se propague también en la superficie límite (interfaz).

4.7 FACTORES IMPORTANTES EN LA TRANSMISIÓN DE ULTRASONIDO POR LA SUPERFICIE DE EXPLORACIÓN

Entre los factores que influyen en la transmisión de ultrasonido podemos mencionar los siguientes:

- Medio de acoplamiento
- Acabado superficial
- Curvatura superficial
- Frecuencia y diámetro del cristal

4.7.1 Medio de Acoplamiento. El propósito del uso de acoplante en ultrasonido, es el de proveer una trayectoria con baja existencia a la transmisión del sonido, entre el palpador y la pieza de ensayo. El aire es un mal transmisor de la energía ultrasónica (altas frecuencias). Adicionalmente, su impedancia acústica es muy diferente a la de los materiales sólidos, por lo que, para frecuencias del orden de 200 kHz, estimando que el espesor de la película de aire fuera aproximadamente 0,00001 mm, se obtendría una transmisión en el aluminio del orden del 80 % de la presión acústica incidente. Para este orden de frecuencias, la transmisión en el acero sería aún del orden del 30% de la presión acústica incidente. Pero para las frecuencias normales de ensayo (2 a 10 MHz), y espesores de película de aire del orden de 0,0001 mm, la transmisión, en ambos casos, sería nula. Tan sólo una pequeña capa de un material acústicamente transmisor, es suficiente para proporcionar una buena transmisión de la onda.¹²

La fina capa o película de acoplante garantiza:

- La eliminación total del aire entre la pieza y el palpador para un correcto acoplamiento acústico (con esto reducimos la relación de impedancias aumentando el factor de transmisión o el porcentaje de energía transmitida)
- El palpador puede moverse sobre la superficie de la pieza con facilidad y sin rozamiento.

Estos acoplantes deberán ser siempre sustancias líquidas con una cierta viscosidad que garantice la tenacidad, resistencia y propiedades lubricantes.

¹²Curso Básico de Ultrasonido, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela.

De igual forma el acoplante debe ser homogéneo estar libre de partículas tanto sólidas como burbujas, no debe reaccionar con la superficie y debe ser de fácil retiro.

Los acoplantes más empleados son: aceites lubricantes (según norma SAE 20 y SAE 30), glicerina, benceno, pastas acoplantes (cola celulósica), siliconas, soluciones jabonosas o agua con aditivos humectantes.

La selección de estos acoplantes varía dependiendo de criterios como:

- Costo
- Disponibilidad
- Requerimientos de limpieza después del diagnóstico
- Adherencia a la superficie
- Viscosidad
- Reacciones químicas en la superficie

4.7.2 Acabado Superficial. Los efectos que producen la condición de acabado superficial los podemos agrupar en dos grupos:

- Efecto de la condición superficial.
- Efecto del acabado superficial.

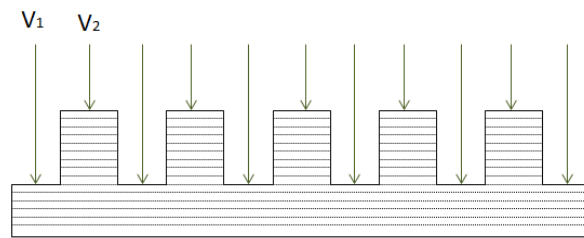
4.7.2.1 Efecto de la Condición Superficial. En el análisis de debe tener en cuenta las condiciones de la superficie de exploración, superficies en las que exista oxido, o cavidades de aire, recubrimientos de cualquier especie, tanto tratamientos del material como resultados de procesos de producción. Estas condiciones provocan una pérdida sensible en la transmisión de la presión acústica incidente, es por esta razón que antes de realizar la inspección se debe acondicionar la superficie, sea con lija, con desbaste o cualquier otra técnica de limpieza.

4.7.2.2 Efecto del acabado superficial. Los efectos debido a un acabado superficial regular pueden ser:

- Disminución de la transmisión acústica
- Aumento de la anchura de la zona muerta
- Cambios en la dirección del haz ultrasónico y generación de ondas parasitas superficiales

La disminución de la transmisión de la presión acústica, depende de la rugosidad, de la frecuencia y del índice de refracción.

FIG 23Acabado superficial



Fuente: Autores

Pensemos en un caso como se ilustra en la figura, pensando que existe un acoplante líquido en la superficie, se puede concluir que las ondas se propagaran a distintas velocidades según si se encuentra en el valle o en una cresta de la superficie rugosa.

Cuando la diferencia entre el tiempo que gasta una onda en recorrer un valle y una cresta sea igual a la diferencia de alturas entre el valle y cresta, se producirá un fenómeno de interferencia en el plano de las ondas, lo que podría dar como resultado una anulación de la presión acústica resultante.

La rugosidad medida para la cual se produciría este tipo de interferencia se denomina rugosidad crítica y se encuentra expresada de la siguiente manera:

$$Rc = \frac{\lambda 2 * V1}{2 * (V2 - V1)}$$

$$Rc = \frac{\lambda_1 * V_2}{2 * (V_2 - V_1)}$$

Dónde:

Rc = Rugosidad crítica.

λ_1 = longitud de onda en el líquido.

λ_2 = longitud de onda en el metal.

V1 = velocidad en el líquido.

V2 = Velocidad en el metal.

4.7.3 Curvatura Superficial. El efecto de curvatura principalmente lo que ocasiona es una divergencia del haz incidente, produciendo un aumento o disminución de la focalización y generando resultados erróneos.

Este efecto depende de cómo se realice el ensayo; con incidencia normal o incidencia angular.

4.7.4 Frecuencia y diámetro del Cristal. Se debe tener presente de las ecuaciones descritas anteriormente que entre mayor sea la longitud de onda, mayor será la rugosidad crítica, en conclusión estaremos más lejos de las condiciones de interferencia y pérdidas de transmisión de presión acústica.

Entre mayor sea el grado de rugosidad, será aconsejable reducir la frecuencia de ensayo, dentro de los rangos permitidos que me garanticen una sensibilidad y resolución requerida.

La frecuencia de excitación y el diámetro del cristal piezoeléctrico, se encuentran relacionados con la longitud del campo cercano, con la divergencia del haz ultrasónico, el poder de penetración, la sensibilidad y el poder de resolución.

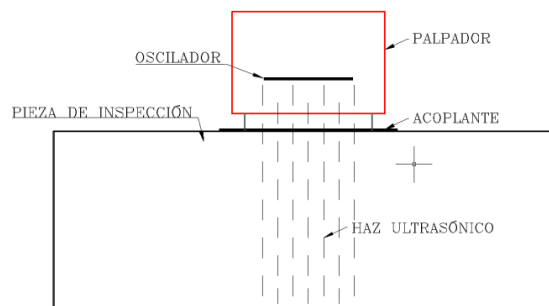
5. METODOS Y TÉCNICAS BÁSICAS APLICADOS EN LA INSPECCIÓN POR ULTRASONIDO

5.1 MÉTODO POR CONTACTO DIRECTO

Su principio se basa en el contacto directo entre el palpador y la superficie de la pieza a inspeccionar, colocando un material acoplante entre estas para garantizar una buena transmisión de la onda. La ejecución del método se puede llevar a cabo mediante tres técnicas, las cuales varían según la incidencia del haz.

5.1.1 Técnica de haz normal. En esta técnica, la incidencia del haz ultrasónico es perpendicular a la superficie límite, o interface palpador-superficie de ensayo.¹³ En la técnica se transmite el tipo de onda longitudinal o de compresión.

FIG 24Técnica de haz normal



Fuente: Autores

¹³Curso Ultrasonido Nivel I, T.P. Group S.A. Cap. 6.

La figura es un ejemplo, donde el recorrido del haz es en la dirección del espesor de la pieza, formando un ángulo de 90° con respecto al plano superficial, para este tipo de inspección se pueden utilizar palpadores de cristal único o emisor – receptor.

5.1.2 Técnica de haz angular. En esta técnica el ángulo de incidencia del haz angular, depende del ángulo de refracción de este mismo en el material; así cuando el haz longitudinal de incidencia angular, hace contacto con la superficie límite, produce tres haces: un haz longitudinal reflejado, un haz longitudinal refractado y un haz transversal refractado, lo cual hace que el valor del ángulo de refracción lo del valor de los ángulos críticos, buscando transmitir en el material solo ondas transversales o de cizalladura, así:

$$\alpha_{CL} < \alpha_i < \alpha_{C2}$$

α_i = *ángulo de incidencia*

α_{CL} = *primer ángulo crítico*

α_{C2} = *segundo ángulo crítico*

Si se conoce el ángulo de incidencia como las velocidades, longitudinal para el material de la zapata y transversal para el material de la pieza bajo ensayo, se podrá calcular el ángulo de refracción del haz ultrasónico en la pieza de inspección. Este cálculo se realiza mediante la Ley de Snell.¹⁴

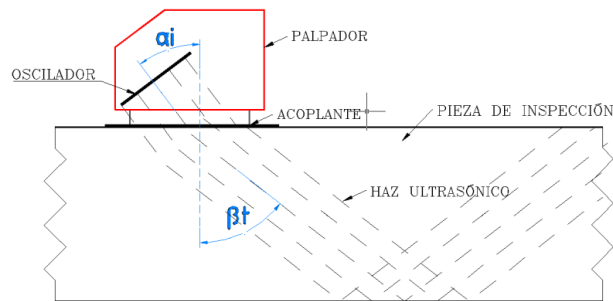
¹⁴Curso Básico de Ultrasonido, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela. Cap. 4

$$\frac{\text{Sen } \alpha_i}{V_{L1}} = \frac{\text{Sen } \beta_T}{V_{T2}}$$

V_{L1} = velocidad acústica de onda longitudinal del medio 1

V_{T2} = velocidad acústica de onda transversal del medio 2

FIG 25 Técnica de haz angular

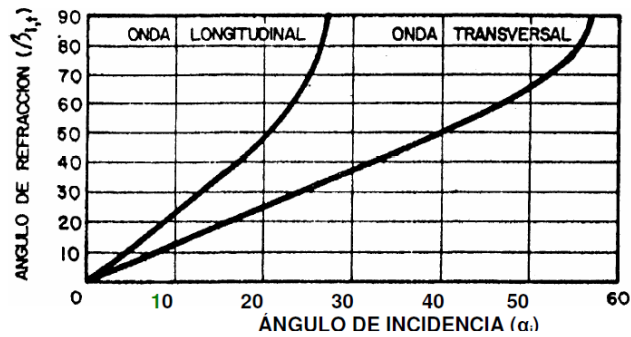


Fuente: Autores

La selección de un palpador, está dada por su frecuencia de excitación, material del cristal piezoeléctrico, dimensiones y ángulo de refracción en acero; mediante la ecuación de Snell, es posible obtener el ángulo de incidencia, del palpador, como el ángulo de refracción para cualquier material.

La siguiente figura muestra la relación entre los ángulos de incidencia y refracción, para ondas longitudinales y transversales en una pieza de acero.

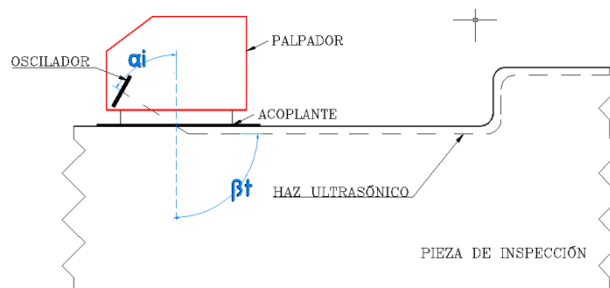
FIG 26 Relación entre los ángulos de incidencia y refracción para ondas longitudinales y transversales



Fuente: Curso Básico de Ultrasonido, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela.
Cap. 4

5.1.3 Técnica de haz superficial. En la técnica de haz superficial, el ángulo de incidencia es ligeramente mayor que el segundo ángulo crítico, por lo que las ondas transversales o de corte se convertirán en ondas superficiales o de Rayleigh, y viajarán a lo largo de la superficie de la pieza de ensayo. Las ondas de superficie, penetran el material bajo ensayo una profundidad equivalente a una longitud de onda.¹⁵

FIG 27 Técnica de haz superficial



Fuente: Autores

¹⁵ Curso Básico de Ultrasonido, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela. Cap. 4

En esta técnica, apenas una longitud de onda penetra la superficie, siendo así únicamente apropiada para la detección de fallas superficiales o cercanas a esta; es una técnica donde se debe ser muy cuidadoso, puesto que la rugosidad de la superficie o el medio acoplante pueden causar mayor interferencia con las ondas.

Los ángulos de incidencia y refracción son obtenidos mediante la ley de Snell, conociendo la velocidad longitudinal de la zapata del palpador como la velocidad superficial del material bajo ensayo, así:

$$\frac{\text{Sen } \alpha_i}{V_{L1}} = \frac{\text{Sen } \beta_T}{V_{T2}}$$

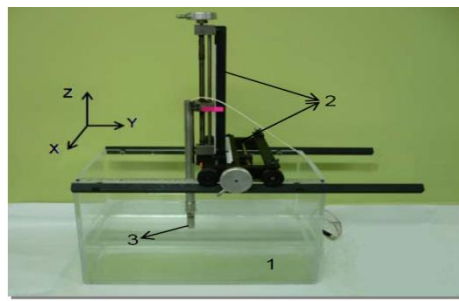
5.2 MÉTODO POR INMERSIÓN

Este método se efectúa generalmente por medio de sistemas automáticos o semiautomáticos. Los principales sistemas de ensayo son:

- ✓ Sistema de Inmersión en Tanque
- ✓ Sistema de Chorro de Agua
- ✓ Sistema de Rueda

5.2.1 Sistema de inmersión en tanque. Acá la pieza y el palpador se encuentran sumergidos en un tanque con material acoplante, el cual puede ser agua y un agente humectante.

FIG 28 Sistema de inmersión en tanque

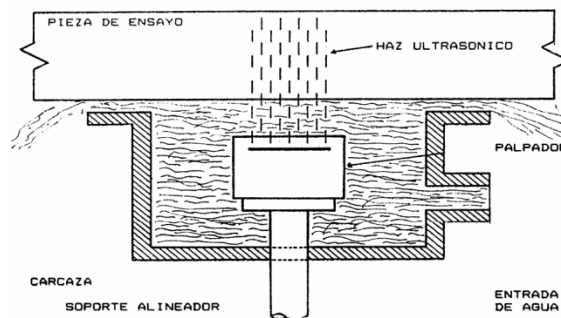


Fuente: Extraído de Aplicación de la técnica de ultrasonido para la estimación de la pérdida de espesor en la superficie externa de una pieza tubular, Adriana Catalina Moros-Elkin Yesid Torres.

1. Tanque de inmersión
2. Brazo mecánico, carro y rieles.
3. Palpador.

5.2.2 Sistema de chorro de agua. En este sistema el haz ultrasónico se propaga a través de una columna constante de agua, que sirve como acoplante para hacer el contacto con la superficie del objeto. El agua es mezclada con aditivos, con el fin de eliminar la formación de burbujas que pueden producir interferencias en la transmisión.

FIG 29 Sistema de chorro de agua

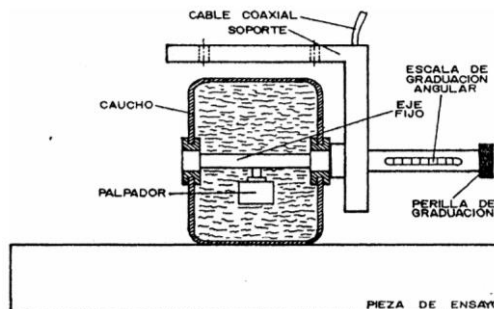


Fuente: Extraído de Curso Básico de Ultrasonido, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela. Cap. 4

Su principal uso es en montajes automáticos de alta velocidad de inspección, acá se desplaza: el palpador con sus accesorios sobre la superficie de la pieza y la pieza de ensayo. El agua (agente acoplante) siempre fluye buscando eliminar los vacíos existentes entre el palpador y la pieza, evitando interrumpir la transmisión.

5.2.3 Sistema de rueda. Tipo de ensayo donde el haz ultrasónico se proyecta mediante el agua que está encerrada por una lámina de caucho delgada. El palpador se encuentra sujeto al eje de la rueda, la cual gira libremente; este sistema de rueda puede ser móvil o fijo.

FIG 30 Sistema de rueda



Fuente: Extraído de Curso Básico de Ultrasonido, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela. Cap. 4

El sistema mostrado es utilizado en ensayos de alta velocidad, en piezas con grandes contornos superficiales. Una de las limitaciones del ensayo con el sistema de rueda, es que las condiciones y la calidad de la superficie de la pieza de ensayo deben ser buenas, pues de otra forma, el contacto entre el caucho y la superficie no sería total y habría pérdidas en la transmisión del haz. Generalmente, entre el caucho y la superficie de la pieza de ensayo se coloca aceite para evitar burbujas de aire que puedan interferir con la transmisión adecuada del sonido.¹⁶

Los métodos de inmersión son utilizados comúnmente en chequeos de producción en serie, donde los ensayos son llevados a cabo automáticamente.

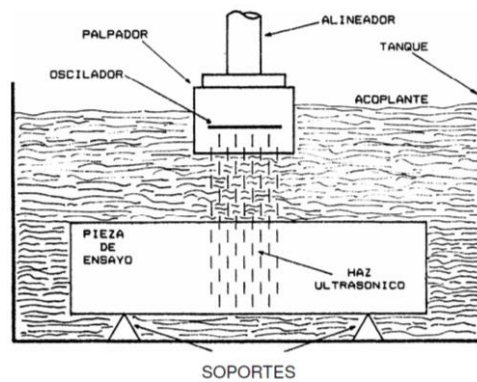
¹⁶Curso Básico de Ultrasonido, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela. Cap. 4

5.3 TÉCNICAS DE INMERSIÓN

5.3.1 Técnica de haz normal. En esta técnica la incidencia del haz ultrasónico es perpendicular a las superficies límites, palpador – acoplante y acoplante – pieza, se transmiten ondas de tipo longitudinal.

En inmersión la zona muerta y de campo cercano, se propagan en el agua o elemento acoplante, logrando mayor detección de discontinuidades cercanas a la superficie superior de la pieza de inspección, puesto que la distancia entre la superficie del palpador y la pieza son grandes en comparación con el método de contacto.

FIG 31 Técnica de haz normal para inmersión



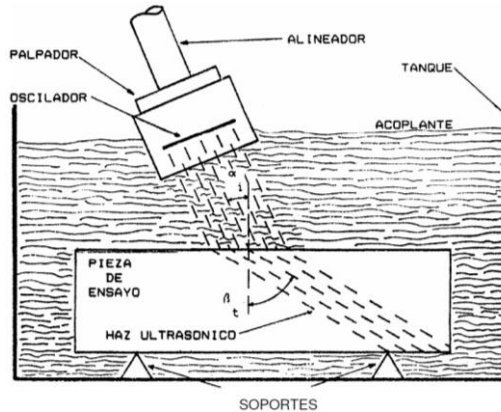
Fuente: Extraído de Curso Básico de Ultrasonido, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela. Cap. 4

5.3.2 Técnica de haz angular. En esta técnica el palpador está sumergido en el medio acoplante, donde la transmisión de la onda longitudinal se realiza perpendicular a la interface agua – palpador, aunque el haz ultrasónico incide en la superficie de la pieza formando un ángulo con la perpendicular al plano de

interface agua – pieza. De la misma forma que por contacto directo este ángulo se puede hallar mediante los ángulos críticos, cumpliendo:

$$\alpha_{CL} < \alpha_i < \alpha_{C2}$$

FIG 32 Técnica de haz angular para inmersión



Fuente: Extraído de Curso Básico de Ultrasonido, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela. Cap. 4

En el método de inmersión el uso de los palpadores es más amplio, puesto que el mismo palpador funciona para la técnica de haz normal o de haz angular. Es posible fijar un ángulo deseado, para una incidencia angular manipulando el sistema de ensayo.

5.4 VENTAJAS Y LIMITACIONES DE LOS MÉTODOS

5.4.1 Ventajas del método de contacto directo. Las principales ventajas son:

- Flexibilidad en la ubicación del equipo.
- El requerimiento mínimo de accesorios de instrumentación.
- La posibilidad de usar ondas superficiales.
- Gran poder de penetración.
- La posibilidad de ensayar piezas de gran tamaño.

5.4.2 Ventajas del método de inmersión. Las principales ventajas son:

- Permite la detección de defectos muy pequeños y altas velocidades de inspección.
- La angulación del palpador se hace muy fácilmente.
- Se posibilita el estudio de piezas con irregularidades superficiales.
- Buena resolución superficial.

5.4.3 Limitaciones del Método de Contacto Directo.

- Necesita que la superficie de contacto palpador - pieza de ensayo sea uniforme, con el fin de poder mantener un buen contacto acústico entre ambos.
- Presenta dificultad de mantener el acoplamiento uniforme entre el palpador y la superficie de ensayo, generando variación en los resultados.
- Uso de acoplantes pesados y de difícil remoción.
- La presencia de las zonas muerta y de campo cercano, limitan la detección de discontinuidades cercanas a la superficie.
- El uso de gran variedad de palpadores debido a la gama de ángulos aplicables en el ensayo.
- El método no puede ser adaptado a sistemas automáticos.

5.4.4 Limitaciones del Método de Inmersión.

- Requiere de una gran cantidad de accesorios.
- En la interface agua-pieza de ensayo, se refleja gran cantidad de la energía ultrasónica, por efecto de la diferencia notable entre las impedancias acústicas de ambos medios, lo que reduce la amplitud de la señal de indicación.
- Se dificulta la inspección a piezas de gran tamaño.

6. TRANSDUCTOR Y GENERACION DEL ULTRASÓNIDO

El uso del ultrasonido como técnica de ensayo no destructivo abarca una gran variedad de dispositivos (generadores, receptores) y técnicas a usar. Este capítulo presenta los tipos básicos de transductores y el principio físico en la generación de ondas ultrasónicas.

6.1 GENERACIÓN DEL ULTRASONIDO

El transductor es un dispositivo, que convierte un tipo de energía en otro tipo de energía, por ejemplo de energía mecánica a eléctrica o viceversa.

Esta conversión de energía se asienta en dos fenómenos físicos:

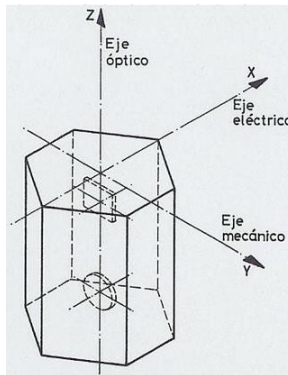
- Efecto Piezoeléctrico.
- Efecto Magnetostrictivo.

6.1.1 Efecto piezoeléctrico. El cristal más usado en ensayos no destructivos, se denomina: cristal piezoeléctrico. El material piezoeléctrico como respuesta a una presión externa genera cargas eléctricas, este fenómeno por los Esposos Pierre y Marie Curie en 1880 y se denominó Efecto Piezoeléctrico Directo.

Un año después en 1881 el efecto inverso fue descubierto por Fritz Albert Lippman, el predijo que al aplicar cargas eléctricas sobre un material piezoeléctrico se generarían deformaciones y por tanto vibraciones, este efecto se denominó Efecto Piezoeléctrico Recíproco.

Las propiedades físicas de los cristales de cuarzo varían dependiendo de las direcciones en que sea cortado. De aquí sus diferentes propiedades: ópticas, eléctricas, etc.

FIG 33 Orientación típica de un cristal de cuarzo

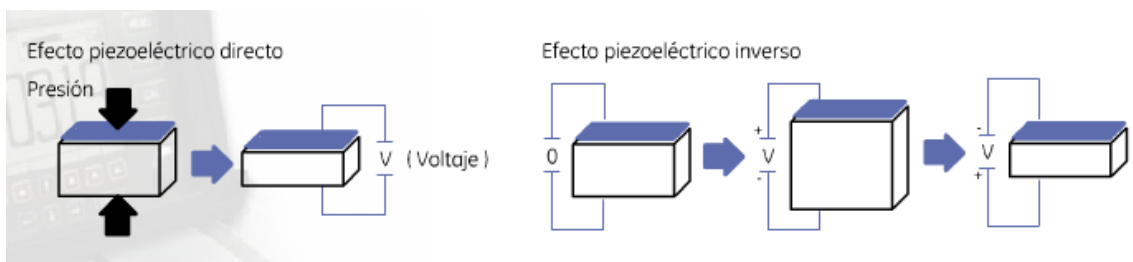


Fuente: Google

La función general de un transductor es la de convertir una señal eléctrica en deformaciones aplicadas y viceversa, gracias a estos fenómenos físicos es que se hace posible el uso de sistemas ultrasónicos.

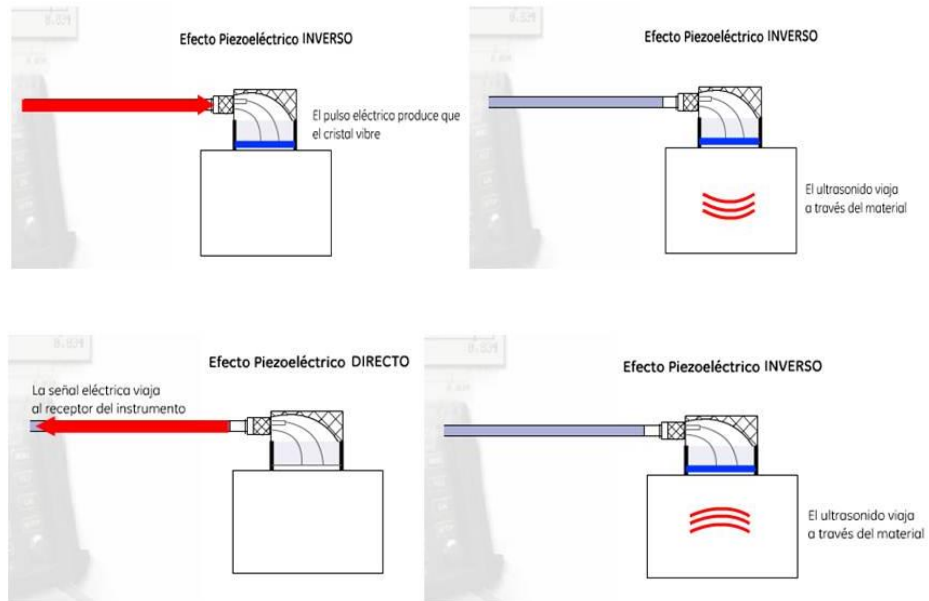
Este es una propiedad de ciertos materiales lo que permite la transformación de energía mecánica en eléctrica y viceversa.

FIG 34 Efecto piezoeléctrico



Fuente: Llog S.A de C.V.

FIG 35 Etapas para la generación del sonido



Fuente: Llog S.A de C.V.

Pierre Curie y su hermano Jacques descubrieron este fenómeno en el cuarzo y la sal de Rochelle en 1880 y lo denominaron efecto piezoeléctrico.

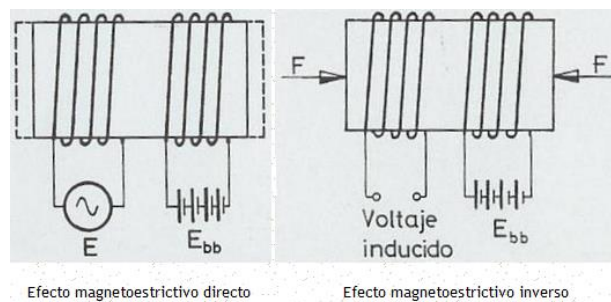
A lo largo del tiempo se han desarrollado mejores materiales piezoeléctricos con buenas características para transductores ultrasónicos.

- Cristales naturales de cuarzo
- Cristales de sulfato de litio monohidratado
- Cerámicas polarizadas policristalinas

6.1.2 Efecto Magnetostrictivo. El efecto Magnetostrictivo es totalmente similar al efecto piezoeléctrico. Los materiales que cumplen dichas propiedades son algunas aleaciones de hierro, níquel y cromo.

Básicamente consiste en aplicar un campo magnético en un material con estas características. Como consecuencia de este campo los dipolos magnéticos presentes se orientan y hacen variar la longitud de la barra. Recíprocamente, una barra magnetizada puede modificar su campo magnético si se hace variar su tamaño mediante acciones mecánicas, esto hace que varíe el flujo magnético, induciendo un voltaje.

FIG 36 Efecto Magnetoestrictivo



Fuente: Google

El diseño y construcción de un transductor ultrasónico depende de factores como:

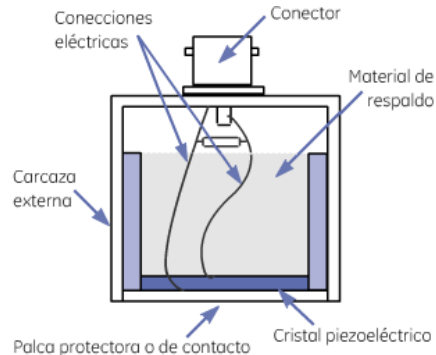
- El material del elemento activo (piezoeléctrico).
- El espesor del elemento activo.
- La placa frontal.
- La forma del transductor
- El grado de amortiguamiento.

6.2 ELEMENTOS QUE FORMAN PARTE DE UN TRANSDUCTOR ULTRASÓNICO

- Elemento activo o cristal piezoeléctrico
- Material de respaldo
- Carcasa externa
- Conector

- Conexiones eléctricas y electrodos
- Placas de contacto o protectoras
- Barrer acústica o cristal

FIG 37Elementos de un transductor



Fuente: Llog S.A de C.V.

6.2.1 Elemento activo. Este es el principal elemento de un transductor ultrasónico, se encarga de convertir la energía eléctrica en pulsos de excitación del detector de fallas en energía ultrasónica. El elemento activo consiste en un elemento Magnetostrictivo cuando se manejan frecuencias de hasta 100 KHz, y para frecuencias mayores de 100 KHz son utilizados elementos piezoeléctricos.

6.2.2 El material de respaldo. Este elemento tiene una gran influencia en la funcionalidad del transductor ultrasónico. Las variaciones en la construcción o en las características del material hacen que el transductor sea bueno para algunas aplicaciones y malo para otras.

Este elemento tiene dos funciones:

- Amortigua las oscilaciones del elemento activo. Al ejecutar esta función se controla el ancho de banda del transductor.

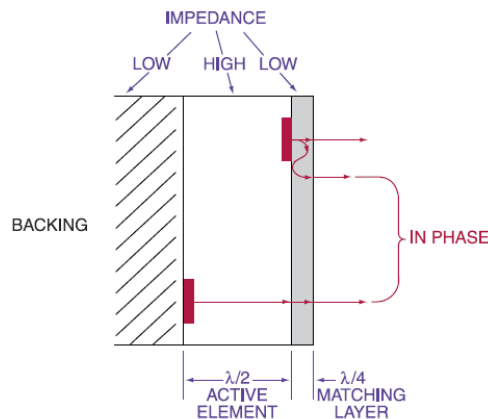
- Absorbe las vibraciones hacia el interior del transductor para que no interaccionen con la carcasa.

Esta energía se produce en dos direcciones, la que es dirigida hacia el interior del transductor debe ser atenuada para evitar que se formen señales falsas. Este material se fabrica de fibras plásticas o polvos de metal combinados con materiales plásticos.

6.2.3 La placa frontal o placa protectora. La función principal de esta placa es proteger al elemento activo de las condiciones presentes durante la inspección, en otros casos actúa como un lente.

Este debe ser de un elemento más durable y resistente a la corrosión. En la figura se muestra el elemento activo y la placa protectora cuando están en fase. Es de importancia que se encuentren porque causarían una ruptura en el frente de las ondas sonoras.

FIG 38Placa protectora y elemento activo



Fuente: Olympus, Ultrasonictransducers.

6.3 TIPOS DE TRANSDUCTORES ULTRASÓNICOS

Existen 4 tipos básicos de transductores:

- De haz recto de contacto
- De haz angular de contacto
- De doble cristal (duales) de contacto
- De inmersión

6.3.1 Transductores de haz recto de contacto. Contiene un solo elemento activo el cual genera ondas longitudinales. Es el más versátil en la detección de fallas. Se utiliza en contacto directo con la pieza a examinar por tanto posee un material altamente resistente al desgaste.

FIG 39 Transductores de contacto



Fuente: tomado de

http://www.llogsa.com/nueva_web/Productos/ultrasonido/transductores/imagenes/home-transductores.jpg

Aplicaciones:

- Detección de fallas con haz recto.
- Medición de espesores.
- Detección y dimensionamiento de laminaciones.
- Caracterización de materiales y medición de la velocidad del sonido.
- Inspección de placas, barras forjas, fundiciones, extrusiones y componentes no metálicos.

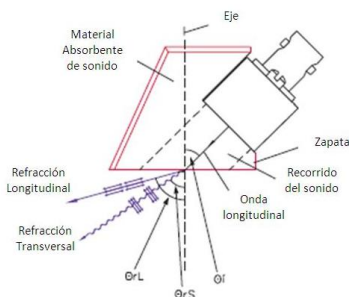
Ventajas:

- Su resolución cercana es buena.
- Líneas de retardo con contorno proporcionan un mejor acople en superficies curvas.
- Inspección de materiales a temperaturas elevadas, para estas condiciones se recomienda que el contacto sea intermitente, aproximadamente tiempo de contacto 10 segundos.

6.3.2 Transductores de haz angular de contacto. Estos transductores utilizan los principios de convección y refracción para producir ondas transversales refractadas a la pieza inspeccionada.

Estos transductores usan una zapata fabricada de una resina para que la onda viaje de forma inclinada esto lo que hace es mejorar la habilidad para inspección de discontinuidades.

FIG 40 Transductores de haz angular



Fuente: Olympus, Ultrasonic transducers.

θ_{rL} = *Angulo de refracción onda longitudinal*

θ_{rS} = *Angulo de refracción onda transversal*

θ_i = *Angulo incidente de la zapata*

Aplicaciones:

- Inspección en uniones soldadas
- Detección y dimensionamiento de grietas
- Inspección de sistemas de tuberías, tubos, forjas, fundiciones y componentes estructurales.

6.3.3 Transductores de doble cristal (Duales) de contacto. Estos transductores poseen dos elementos activos en una misma carcasa, montadas sobre líneas de retardo, y ligeramente inclinados y separados por una barrera acústica.

Existen dos elementos un transmisor de ondas longitudinal y un receptor.

FIG 41 Transductores duales



Fuente: Olympus, Ultrasonic transducers.

Aplicaciones:

- Medición de espesor remanente de espesor
- Monitoreo de corrosión/erosión
- Inspección de soldadura de recubrimiento
- Detección de discontinuidades

Ventajas:

- Se elimina el disparo principal mejorando la resolución cercana
- El diseño del haz inclinado proporciona un pseudo-foco que los hace sensible a ecos de reflectores de forma regular tales como corrosión o picaduras.
- Reduce el ruido en materiales de grano grueso o de gran dispersión
- Ideal para aplicaciones a baja temperatura

Estos tipos de transductores tiene una gran limitante, solo pueden ser usados para rangos específicos de espesores, por tanto se debe tener en cuenta su selección y uso de este tipo de transductor.

6.3.4 Transductores de inmersión. Este tipo de transductor es utilizado en situaciones donde la pieza se encuentre total o parcialmente sumergido en algún acoplante, donde generalmente es agua.

FIG 42 Transductores de inmersión



Fuente: Olympus, Ultrasonictransducers

Este tipo de transductor con respecto a los anteriores posee tres ventajas:

- El acoplamiento es más uniforme por tanto reduce las variaciones en la sensibilidad.
- Reduce el tiempo de barrido gracias a su automatización.
- Usa transductores focalizados lo que permite tener una mejor resolución y una baja sensibilidad.

Se tienen tres configuraciones con estos transductores, no focalizados, focalizados esféricos y focalizados cilíndricos.

Cada uno de estas configuraciones tiene uniones como: inspección de materiales espesor y grueso, discontinuidades pequeñas, inspección de tuberías o barras.

6.4 CARACTERISTICAS AVANZADAS DE UN TRANSDUCTOR

6.4.1 Forma de Onda y espectro del transductor. En un análisis de frecuencia las unidades típicas son los MHz, para un análisis de forma de onda son los us, y para medir la amplitud de la señal son los dBs.

6.4.2 Impedancia acústica, reflectividad y atenuación. Como ya es entendido anteriormente la impedancia acústica de un material no es más que la oposición al desplazamiento de sus partículas por el sonido.

$$z = \rho C$$

Dónde:

Z=Impedancia acústica

C=Velocidad del sonido en el material

ρ = Densidad del material

La frontera donde se presentan cambios de impedancia es conocida como interface acústica. Cuando el sonido choca contra esta interface acústica con una incidencia normal, parte de esta energía se refleja y parte se transmite por la frontera.

Mediante la siguiente ecuación podemos calcular la energía perdida de un medio a otro.

$$^{17}dB_{perdidos} = 10\text{Log}_{10}\left[\frac{4Z_1Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2}\right]$$

Dónde:

Z1=Impedancia acústica del primer material

Z2=Impedancia acústica del segundo material

Mediante la ecuación siguiente podemos calcular la pérdida de energía del eco producido por la señal en el medio uno reflejando en la frontera con el medio dos.

$$^{18}dB_{perdidos} = 10\text{Log}_{10}\left[\frac{(Z_1Z_2)^2}{(Z_1 + Z_2)^2}\right]$$

Podemos tomar como ejemplo dos medios, el agua con una impedancia acústica Z=1,48 y el acero con una impedancia acústica Z=45,41. Los dB perdidos en la transmisión son -9,13dB; está pérdida es similar a la transmitida desde el acero al agua. Los dB perdidos por el eco del acero en el agua son -0,57dB, lo mismo que se transmitiera del acero al agua.

6.4.3 Campo de sonido. El campo de sonido en un transductor se puede dividir en dos zonas; el campo próximo y el campo lejano.

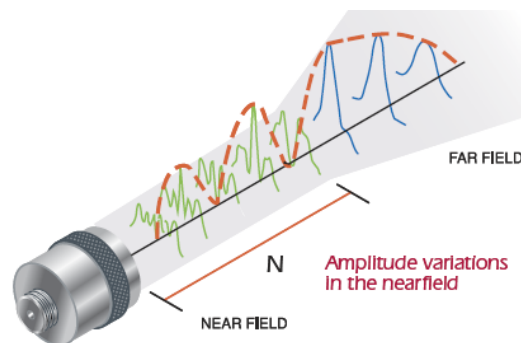
¹⁷Olympus, Ultrasonic transducers.

¹⁸Olympus, Ultrasonic transducers.

El campo próximo en un transductor es aquella zona donde el eco tiene una serie de amplitudes máximas y mínimas y terminan en el último máximo a una distancia N del transductor, esta último máximo es conocido como la distancia del campo cercano y es el enfoque del transductor. El campo lejano es aquella zona que se encuentra después de la distancia N o el último máximo, hasta la zona donde la presión del sonido ha disminuido gradualmente a cero.

Evaluar dichas distancias es complicado debido a las variaciones del campo cercano que es función de la frecuencia del transductor, el diámetro del elemento y la velocidad del sonido en el material a probar.

FIG 43 Campo lejano y cercano



Fuente: Olympus, Ultrasonic transducers.

Podemos tener una estimación del campo a través de las siguientes expresiones:

$$^{19}N = \frac{D^2 f}{4c}$$

$$^{20}N = \frac{D^2}{4\lambda}$$

¹⁹Olympus, Ultrasonic transducers.

Dónde:

N = Distancia del campo próximo

D = Diámetro del elemento

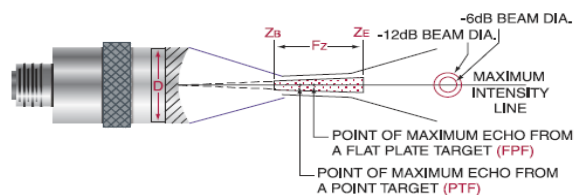
f = frecuencia

c = Velocidad del sonido en el material

λ = Longitud de onda

6.4.4 Diámetro de la emisión. Existen otros parámetros para describir las características del transductor. Poder tener un conocimiento sobre el ancho de emisión y la zona de enfoque puede ser necesario para determinar si un transductor es apropiado para una determinada aplicación. En la siguiente figura vemos la representación gráfica de estos parámetros.

FIG 44 Otros parámetros en la emisión del sonido



- Z_B = Beginning of the Focal Zone
- F_Z = Focal Zone
- Z_E = End of the Focal Zone
- D = Element Diameter

Fuente: Olympus, Ultrasonic transducers.

Una de estas propiedades importantes es el diámetro de la emisión en el punto de interés. Se debe tener en cuenta que entre menor sea el diámetro de emisión, mayor será la energía reflejada por la señal. Podemos tomar como ejemplo un

²⁰Olympus, Ultrasonic transducers.

pulso eco de -10 dB, para calcular el diámetro de emisión podemos hacerlo mediante la siguiente expresión.

$$D_E(-10 \text{ dB}) = 1.02FC/fD$$

$$D_E(-10 \text{ dB}) = 0.2568DS_f$$

Dónde:

D_E =Diámetro de la emisión

F= Longitud de foco

C =Velocidad del sonidos de un material

D = Diámetro del elemento

S_f = Longitud del foco normalizada

6.4.5 Zona de enfoque. La zona de enfoque la podemos definir por la siguiente expresión.

$$F_z = NS_f^2 \left[\frac{2}{1 + 0,5SF} \right]$$

Dónde:

F_z = Zona focal

N = Campo próximo

S_f = Longitud del foco normalizada

6.5 EXITACION DE UN TRANSDUCTOR

El máximo voltaje de excitación debe estar limitado a aproximadamente 50 voltios por milésima de pulgada del grosor del piezoeléctrico. Los elementos de baja

frecuencia suelen ser más gruesos, y los elementos de altas frecuencias más delgados. Una diferencia de potencial de 600 voltios, durante un breve periodo de tiempo suele ser usada a través de los terminales de un transductor de 5,0MHz y frecuencias menores. Para transductores de 10MHz, la diferencia de potencial está alrededor de 300 voltios medidos a través de los terminales. Aunque se recomiendan los picos de excitación negativos, pueden usarse igualmente ondas continuas o ráfagas de excitación. En primer lugar, la potencia media disipada por el transductor no debe exceder de 126mW para evitar el sobrecalentamiento del transductor y la despolarización del cristal. Dado que la potencia media depende de cierto número de factores como el voltaje, el ciclo útil de funcionamiento y la impedancia eléctrica del elemento, se pueden usar las siguientes ecuaciones para estimar la duración de la excitación máxima, así como el número de ciclos de una ráfaga para mantenerse dentro de las limitaciones máximas de potencia:²¹

$${}^{22}V_{rms} = \frac{0,707V_{pp}}{2}$$

$$P_{pot} = \frac{(CUF)(V_{rms})^2 \cos(\varphi)}{z}$$

$$C_{craf} = \frac{f C_{UF}}{T_{rep}}$$

Dónde:

V_{pp} = Voltaje pico a pico

P_{pot} = Potencia total

C_{craf} = Ciclos de ráfaga

C_{UF} = Ciclos de funcionamiento útil

T_{rep} = Tasa de repetición

²¹Olympus, Ultrasonic transducers.

²²Olympus, Ultrasonic transducers

φ =Fase del ángulo

6.5 COMO SELECCIONAR UN TRANSDUCTOR

El máximo voltaje de excitación debe estar limitado a aproximadamente 50 voltios por milésima de pulgada del grosor del piezoeléctrico. Los elementos de baja frecuencia suelen ser más gruesos, y los elementos de altas frecuencias más delgados. Una diferencia de potencial de 600 voltios, durante un breve periodo de tiempo suele ser usada a través de los terminales de un transductor de 5,0MHz y frecuencias menores.

Para transductores de 10MHz, la diferencia de potencial está alrededor de 300 voltios medidos a través de los terminales.

Aunque para picos negativos se recomienda continuas excitaciones, pueden utilizarse ráfagas de onda, sin embargo, hay limitaciones a tener en cuenta cuando se utiliza este tipo de excitación, en primer lugar, la disipación de potencia media para el transductor no debe exceder de 125 mW para evitar el sobrecalentamiento del transductor y del cristal.

Este es un elemento importante en sistemas de inspección como también lo son todos aquellos factores y características del elemento, propiedades del material, condiciones de acople todo esto tiene un papel importante en la funcionalidad del sistema.

El primer aspecto a tener en cuenta es la selección adecuada de la frecuencia. Se recomienda inspeccionar a la más baja frecuencia con la que se detecte un defecto o discontinuidad deseada.

Debido a una gran variedad de factores de los materiales se hace imposible encontrar la frecuencia optima y menos si no disponemos de algún instrumento para realizar la práctica.

En general podemos disponer de algunas frecuencias de inspección en la siguiente tabla.

Tabla 2 Frecuencia recomendadas para algunos materiales

MATERIALES	FRECUENCIAS DE INSPECCION
Aceros de grano fino	2 a 5,0 MHz y para discontinuidades pequeñas se selecciona hasta 10 MHz.
Fundiciones de acero de mediano carbón	1 a 5 MHz
Fundiciones de acero de alto carbón	Se requieren frecuencias bajas como 0,5 MHz.

Fuente: Autores

7. TECNICAS DE INSPECCIÓN EN EL ENSAYO ULTRASÓNICO

7.1 GENERALIDADES

Existen cuatro etapas esenciales en una práctica no destructiva, para evaluar la condición física de una pieza:

- Elección del método y las técnicas de operación idóneas
- Obtención de una indicación propia
- Interpretación de la indicación
- Evaluación de la indicación

Para producir una indicación propia de la pieza a ensayo, lo cual proviene de alguna discontinuidad presente, es necesario tener conocimientos del método a utilizar, los equipos y técnicas de operación más adecuadas, así como se requiere de una configuración del sistema de excitación, de emisión y recepción de las ondas, sistemas de representaciones y monitores, cristales piezoeléctricos, palpadores y zapatas.

7.2 SISTEMA DE EXCITACIÓN PARA GENERAR EL ULTRASONIDO

Al aplicarse una carga eléctrica a un cristal piezoeléctrico el cual está haciendo la función de dieléctrico dentro de un condensador, se produce una deformación en el cristal que es proporcional a la diferencia de potencial aplicado. Si el voltaje que se aplica al cristal es alterno, este oscilará generando vibraciones elásticas, así para producir una onda ultrasónica basta someter al cristal a un voltaje sinusoidal, de modo continuo o por impulsos. Si la fuente de excitación no se interrumpe el

cristal oscilará de manera continua, en el caso de excitación por impulsos, el cristal se excita durante un periodo muy corto para luego quedar en un estado de reposo por un periodo mayor en comparación con la duración del impulso.²³

7.3 SISTEMA DE EMISIÓN Y RECEPCIÓN DEL ULTRASONIDO

7.3.1 Sistema de resonancia. Se fundamenta en la frecuencia de resonancia que tiene cada espesor. Al aplicar esta frecuencia en forma de haz continuo de sonido a la pieza de inspección, se crean ondas estacionarias dentro del material las cuales causan un incremento en la amplitud de la señal de recepción. Se aplica en la medida de espesores de superficies paralelas.

Es decir, la resonancia ocurre cuando el espesor del material es igual a un número entero en el que se repite la mitad de la longitud de onda, lo cual es posible con un control de generación, variando la frecuencia del oscilador.

$$e = \frac{n * \lambda}{2}$$

Con este sistema se pueden medir espesores en piezas de 0.1 a 80 mm, con un error del 1 al 3%. Aunque no es adecuado para medir espesores con pérdida por corrosión o deterioro por agentes ambientales, salvo que el desgaste sea uniforme, puesto que las picaduras y cavidades debidas a corrosión o cavitación, alteran la condición de la superficie reflectante de la pieza.

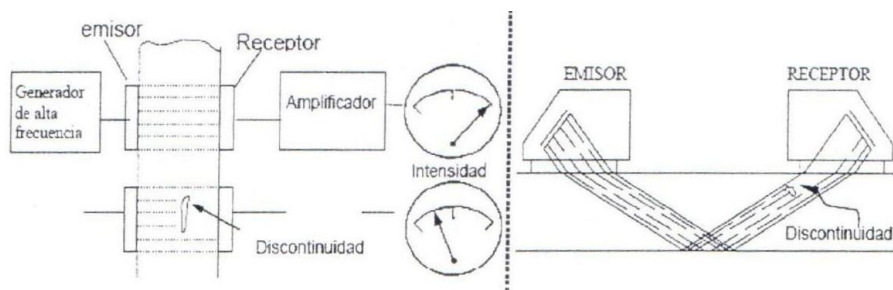
7.3.2 Sistema de transmisión. Está basado en el efecto de la sombra que un obstáculo produce al ser iluminado por un haz ultrasónico. Se requiere el uso de dos palpadores (emisor y receptor) actuando separados y opuestos entre sí,

²³Curso Ultrasonido Nivel I, T.P. Group S.A. Cap. 6.

siendo el receptor quien recoge el debilitamiento de la intensidad acústica del campo ultrasónico por efecto del obstáculo. Estos equipos operan por transmisión, reflexión o conducción del haz ultrasónico mediante un convertidor adecuado; se clasifican en: equipos que miden la intensidad acústica o tiempo de vuelo e intensidad acústica.

El acoplamiento es crítico debido a que las variaciones de transmisión del sonido tienen un efecto en la medición de la intensidad. Acá los palpadores pueden estar en contacto con el material, inmersos en el líquido acoplante o conectados a la pieza mediante una columna de agua.

FIG 45 Sistema de transmisión



Fuente: Curso Ultrasonido Nivel I, T.P. Group S.A. Cap. 6.

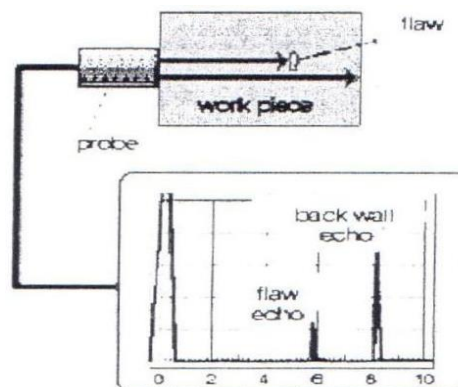
Su principal uso es en inspección de platinas por grietas y laminaciones que tienen grandes dimensiones en comparación con el palpador, no es posible ubicar la discontinuidad con respecto al espesor del material; si se conoce el espesor de la pieza el tiempo de vuelo puede ser utilizado para calcular la velocidad, y así caracterizar la impedancia acústica del material, con eso también se puede utilizar para medir espesores, registrando el tiempo de vuelo del haz.

7.3.3 Sistema de pulso-eco. Es emisión de pulsos ultrasónicos de corta duración, pero a una frecuencia definida. Se basa en el efecto del eco que un reflector produce al ser encontrado por un haz ultrasónico. El receptor recoge el eco del reflector transformándolo en la indicación correspondiente, por lo que siempre opera por reflexión.

En este sistema se puede encontrar los encargados de medir solamente el tiempo de recorrido del haz ultrasónico, para aplicaciones concretas de metrología, y los que miden la intensidad acústica y el tiempo de recorrido conjuntamente, para aplicar en el campo de defectología, caracterización y metrología.

Un equipo de pulso eco de medida de la intensidad acústica y el tiempo de recorrido, emiten impulsos acústicos cortos, a intervalos constantes, de manera que se obtiene una respuesta periódica en función del tiempo de recorrido del impulso acústico desde el emisor al cristal piezoeléctrico receptor. El impulso acústico recibido procede de su reflexión en una discontinuidad o en una superficie límite de la muestra, se transforma en una señal o impulso eléctrico, que se visualiza según una indicación en la pantalla cuya altura es proporcional a la presión acústica del eco.²⁴

FIG 46 Sistema de pulso-eco



Fuente: Curso Ultrasonido Nivel I, T.P. Group S.A. Cap. 6.

²⁴Curso Ultrasonido Nivel I, T.P. Group S.A. Cap. 6.

Es el método más utilizado, también es posible medir el tiempo de vuelo y la atenuación de la señal e involucra la detección de ecos producidos cuando un pulso ultrasónico es reflejado por una discontinuidad o por una interfase. Un equipo está constituido por un sistema de sincronismo, un generador de alta frecuencia, un amplificador y la pantalla de cristal líquido.

Con este método es posible detectar defectos y medición de espesores, la profundidad del defecto se determina por el tiempo de vuelo entre el pulso inicial y el eco producido por el defecto y su tamaño puede ser estimado comparando la señal de amplitud con la producida por un reflector de tamaño conocido presente en un patrón de referencia.

7.3.3.1 Técnica de Pitch Catch. Esta utiliza palpadores para emitir y recibir, acá el recorrido del haz no es recto y es reflejado varias veces antes de ser alcanzado por el receptor. El palpador se sitúa sobre la superficie de la pieza u otra superficie, con el propósito de alinearlas completamente.

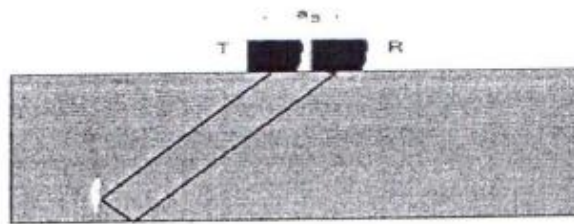
Existe la técnica directa e indirecta en la primera el receptor está ubicado en donde se espera recibir el haz si no existen discontinuidades; si no se obtiene una buena reflexión es muestra de que existe una discontinuidad; es una técnica menos propensa a errores debido a la orientación de la discontinuidad o a rugosidad. En la técnica indirecta el receptor es ubicado en donde se espera recibir una reflexión debida a una discontinuidad, su ventaja es que se puede inspeccionar con mayor rapidez, pero se pueden perder algunas discontinuidades debido a su orientación.

7.3.3.1.1 Técnica TOFD (Time of flight diffraction). En esta técnica las ondas emitidas son difractadas por los extremos de la grieta, así como también son

transmitidas a lo largo de la superficie de barrido y reflejadas por la superficie de fondo. En inspección de tuberías y recipientes a presión presenta ventajas puesto que la inspección es más rápida y no es afectada por las condiciones de la superficie soldada y la orientación de la discontinuidad. Es útil para medir el tamaño de la discontinuidad, pero su aplicabilidad se limita a grietas muy pequeñas cuyos extremos difractan poca energía y no alcanzan a ser detectados.

7.3.3.1.2 Técnica tandem. Se utilizan dos palpadores ubicados sobre la misma superficie y muy cerca el uno del otro, uno actúa como emisor de una onda ultrasónica inclinada y el otro actúa como receptor. El transmisor recibe una señal de amplitud A_1 y el receptor recibe una señal de amplitud A_2 , si la relación entre A_1 y A_2 es mayor que 1 la discontinuidad es esférica, si es menor que 1 será plana.²⁵

FIG 47 Técnica delta



Fuente: Curso Ultrasonido Nivel I, T.P. Group S.A. Cap. 6.

7.3.3.1.3 Técnica delta. Útil para detectar discontinuidades de soldaduras, acá el palpador emisor no está en contacto con la superficie de la pieza y está inclinado a

²⁵Curso Ultrasonido Nivel I, T.P. Group S.A. Cap. 6.

un ángulo, produciendo ondas transversales refractadas a 60° , cuando el haz encuentra una discontinuidad es dispersado; un palpador receptor posicionado perpendicular a la superficie detecta las ondas dispersadas. Como ventajas tiene: el palpador receptor detecta señal cuando hay una discontinuidad, posee mejor relación señal – ruido y mejor resolución del eco de fondo, siendo así que si una discontinuidad está cerca del fondo no hay eco de fondo que interfiera con la señal de la discontinuidad.

8. TIPOLOGIA DE FALLAS POR ULTRASONIDO

Es de gran importancia interpretar de forma adecuada las indicaciones presentes en la pantalla, para esto es necesario conocer las técnicas operatorias, lo cual consiste en hallar correlación entre la indicación observada con la propia naturaleza, morfología, orientación, posición, y tamaño de la discontinuidad y así poder dar un diagnóstico sobre cuál es el motivo de la indicación observada.

Principales parámetros a tener en cuenta para el análisis de una indicación:

- Distancia de la indicación al origen de la pantalla
- Altura de la indicación
- Forma de la indicación
- Cambio que experimenta al mover el palpador
- Variación que sufre con la frecuencia de ensayo.

8.1. DIFERENCIA ENTRE REFLECTOR, DISCONTINUIDAD Y DEFECTO

Un reflector es todo lo que origina un eco de indicación, es decir, una reflexión del sonido; existen reflectores propios de la pieza, es decir, los que por geometría de la pieza originan reflexiones del sonido.

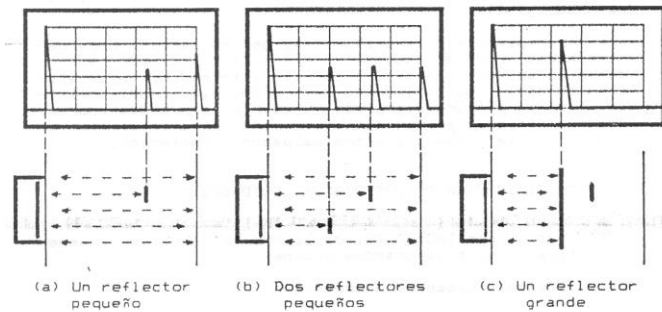
Cualquier eco de indicación o reflexión del sonido producido por cualquier otra causa que no sean las anteriores, se debe tratar como discontinuidad, siendo reflectores no propios de la geometría de la pieza. Al localizar una discontinuidad

es necesario estudiar si esta pone en peligro la función que esta pieza vaya a realizar, puesto que si la hace inapropiada hablaríamos de un defecto.

8.1.1 Reflectores pequeños y grandes. Es conveniente compararlos con algún valor conocido por ejemplo la forma o geometría del haz.

Para determinar la forma de un reflector pequeño es necesario tener en cuenta que una parte del haz sonoro pasa lateralmente por los reflectores pequeños, obteniéndose ecos tanto del reflector como de la pared posterior.

FIG 48 Reflectores pequeños y grandes.



Fuente: Curso Básico de Ultrasonido, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela.

Cap. 7

8.2. CLASIFICACIÓN DE LAS DISCONTINUIDADES

Se clasifican en tres grandes grupos.

8.2.1. Discontinuidades Inherentes. Son aquellas que se originan durante la solidificación del material, entre estas: los agujeros, vacíos de contracción, bolsas de gas, porosidades, inclusiones de escoria o arena.

8.2.2 Discontinuidades de proceso o fabricación. Son todas aquellas originadas durante los procesos de manufactura como: laminación, forja, extrusión, soldadura, tratamientos térmicos, revestimientos metálicos, etc.

8.2.3. Discontinuidades de servicio. Están relacionadas con las condiciones de servicio, como: corrosión, erosión, fatiga, etc.

8.3 INTERPRETACIÓN DE LAS INDICACIONES

8.3.1. Características de las discontinuidades. La posibilidad de detección de una discontinuidad por ultrasonido depende de sus propias características, de las del material que las contiene y de los parámetros de ensayo.

8.3.1.1 Naturaleza de las discontinuidades. Esta influye sobre su impedancia acústica. Es importante la relación con la impedancia acústica del medio que la rodea, puesto que si ambas son similares, la reflexión en la superficie límite será débil, dando lugar a una menor altura de la indicación del eco o incluso a su no aparición.

8.3.1.2. Morfología de las Discontinuidades. La configuración geométrica de las discontinuidades es importante, en cuanto afecta a la cantidad de energía reflejada y, en consecuencia sobre la altura y la forma de la indicación.

8.3.1.3. Orientación de las Discontinuidades. La orientación óptima se produce cuando el plano principal de la discontinuidad es perpendicular al eje del haz ultrasónico.

8.3.1.4. Posición de las Discontinuidades. Si la distancia a que se encuentra la discontinuidad es grande, su eco se puede confundir con el ruido de fondo. Por otra parte la forma de la muestra puede ser o no accesible al haz ultrasónico.

8.3.1.5. Tamaño de las Discontinuidades. Debe ser igual o mayor que la semilongitud de onda del haz ultrasónico.

8.3.2. Detección e identificación de una discontinuidad. Es necesario deducir las siguientes características para un análisis preciso y una buena interpretación.

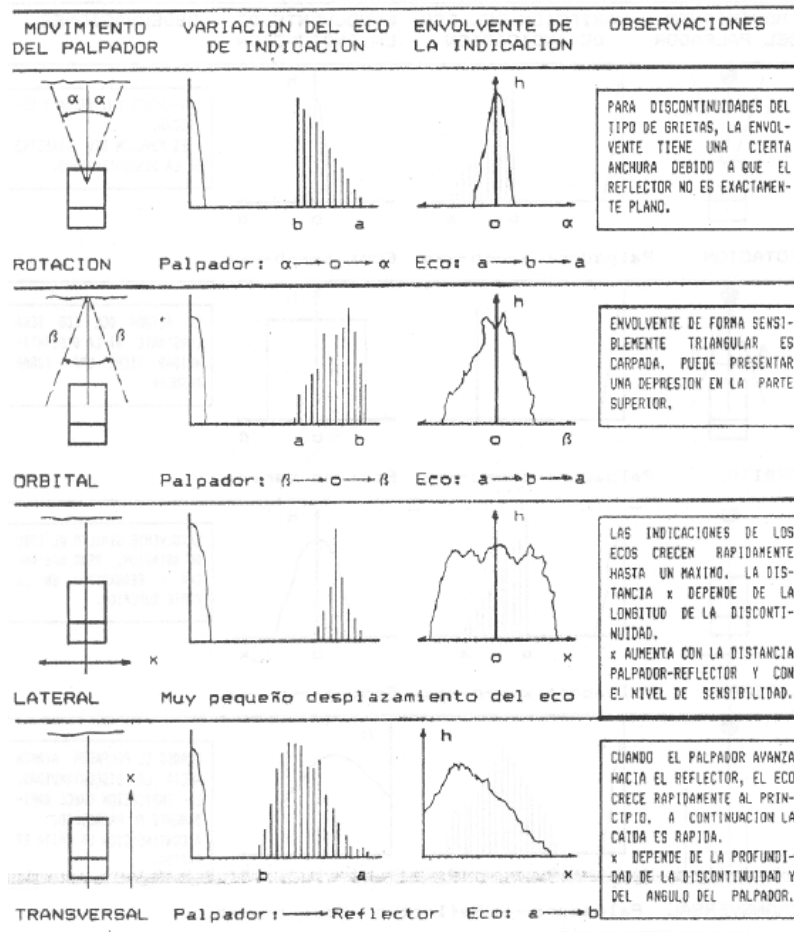
8.3.2.1. Morfología de la Discontinuidad. La forma del eco de indicación, proporciona alguna información acerca de la morfología de la discontinuidad. Si el eco de indicación alcanza su altura total con pocos escalones, normalmente, suele proceder de un reflector plano irradiado en dirección próxima a la perpendicular a dicho plano. Por el contrario, si la discontinuidad no es plana o es irregular o, siendo plana y rugosa, no se irradia perpendicularmente, la elevación del eco de indicación suele ser más gradual, resultando más ancha.

También es posible determinar la morfología del reflector en un análisis a distintas frecuencias. De esta forma, se puede conocer su rugosidad, si es menor que la tercera parte de la longitud de onda, dará una reflexión especular y, si es mayor, la reflexión será difusa. Un eco que a baja frecuencia es único, puede resolverse en varios ecos si se utiliza una frecuencia mayor, revelando que la indicación corresponde bien a una discontinuidad múltiple o bien a una discontinuidad irregular o muy rugosa.

Cuando se utilizan palpadores de incidencia normal a la superficie, suele ser difícil la detección de la discontinuidad desde diversos ángulos, por lo que la información acerca de su morfología no será muy completa. Sin embargo, si se utilizan palpadores angulares, es posible, con frecuencia, irradiar la discontinuidad desde diversos puntos o ángulos, lo que permite mayor precisión en la determinación de su morfología. La forma de la curva envolvente de los picos de las indicaciones

móviles obtenidas al mover el palpador, puede proporcionar una idea acerca de la morfología del reflector. En ensayos con palpadores angulares, las discontinuidades se pueden clasificar dentro de tres categorías:

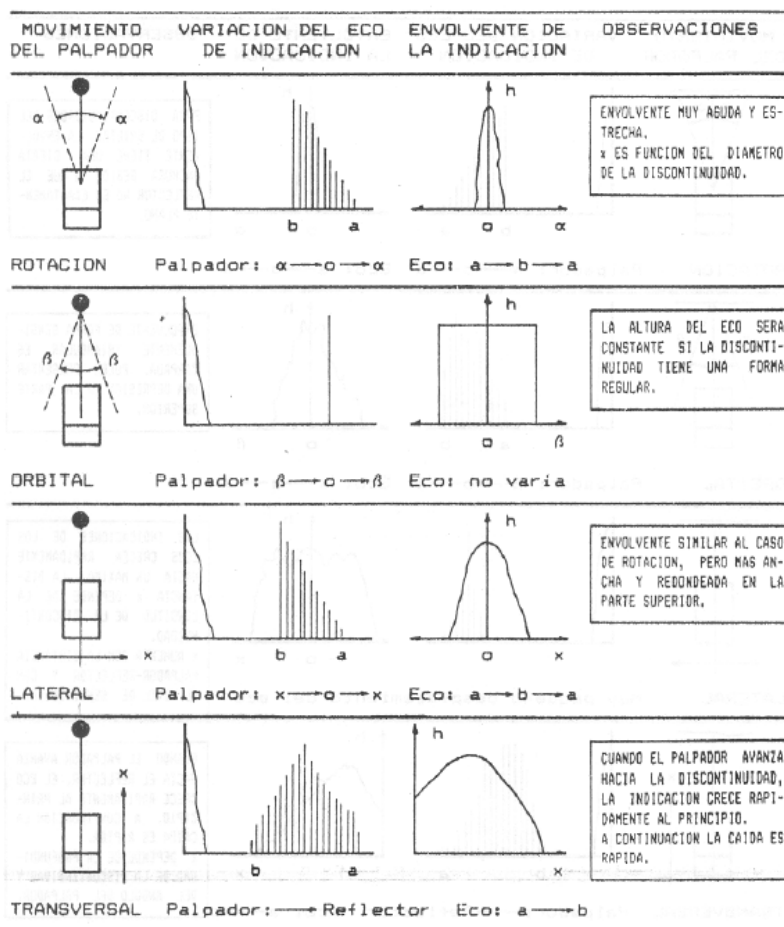
FIG 49 Estudio de un reflector con morfología plana mediante un palpador angular



Fuente: Curso Básico de Ultrasonido, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela.

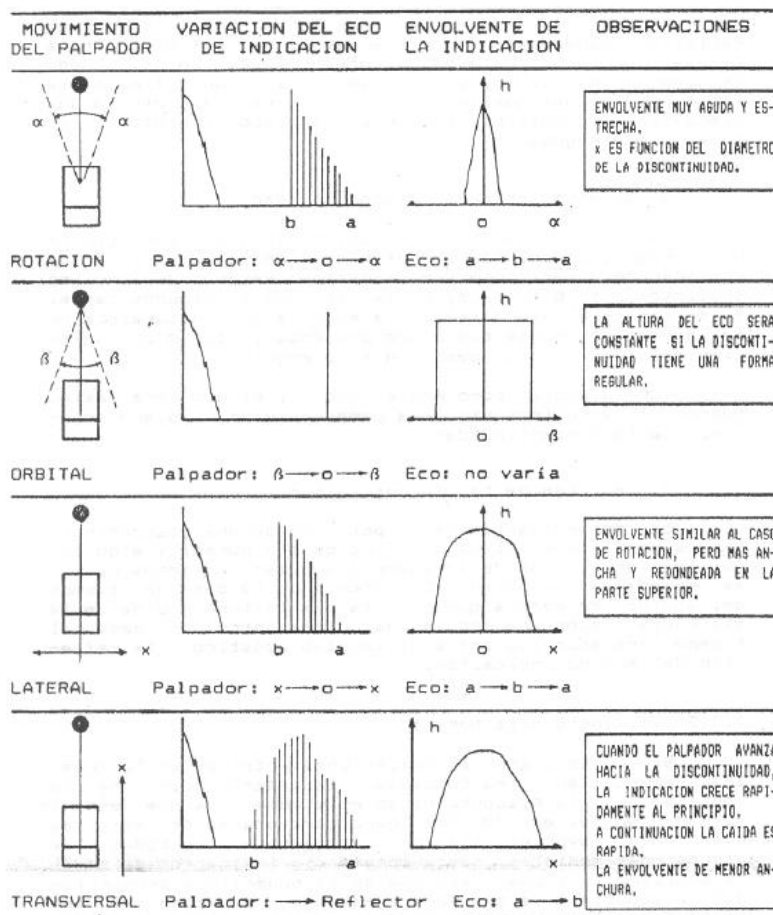
Cap. 7

FIG 50 Estudio de un reflector con morfología cilíndrica mediante un palpador angular (perpendicular al plano)



Fuente: Curso Básico de Ultrasonido, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela.

FIG 51 Estudio de un reflector con morfología esférica mediante un palpador angular



Fuente: curso básico de ultrasonido, facultad de ingeniería, universidad central de Venezuela. cap. 7

8.3.2.2. Orientación de la discontinuidad. Para conocer la orientación de las discontinuidades es necesario examinarla desde tres ángulos distintos, o dos ángulos si se conoce el historial de la muestra y la naturaleza de las discontinuidades.

8.3.2.3 Posición de la discontinuidad. Existen dos casos, incidencia normal e incidencia angular.

8.3.2.3.1 Incidencia Normal. Se tiene la discontinuidad de determinación simple, cuando está situada en el eje del haz y a una distancia de la superficie proporcional a aquella a la que se presenta la indicación del eco en la pantalla. Por otro lado cuando por la forma compleja de la muestra de ensayo se presenta reflexiones internas del haz, es indicado realizar un croquis a escala de la sección recorrida por el haz, y sobre el reconstruir la trayectoria según las leyes de reflexión de manera que se pueda llevar la distancia y obtener así la posición de la discontinuidad.

8.3.2.3.2. Incidencia Angular. Para este caso es más complejo determinar la posición puesto que es necesario hablar de un caso específico.

8.3.2.3.3 Ondas de superficie. Puesto que se encuentran en la superficie es más sencilla la localización y se puede leer directamente sobre la pantalla.

8.3.2.3.4. Tamaño de la discontinuidad. Es un aspecto muy controvertido, debido a que de su tamaño depende la dificultad de detección.

8.3.2.3.5. Naturaleza de la discontinuidad. Esta viene acompañada de todos los ítems mencionados anteriormente para poder dar un diagnóstico confiable, por su naturaleza, las discontinuidades se pueden presentar como un vacío en el material o como impurezas (escorias, inclusiones, segregaciones, etc.)

Para casos donde se requiera una interpretación correcta sobre la discontinuidad, es necesario recurrir al empleo de otros ensayos no destructivos y así complementar la información obtenida.

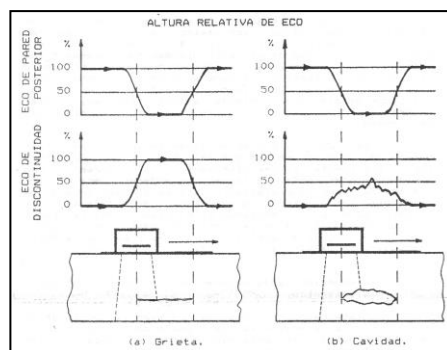
8.3.3 Criterios y técnicas para la determinación del tamaño de las discontinuidades.

8.3.3.1 Discontinuidades mayores que la sección transversal del haz ultrasónico. Se determina el tamaño desplazando el transductor por la superficie de la pieza, de manera que se pueda trazar el contorno de la proyección de la discontinuidad. En la figura se muestra la variación de las alturas de las indicaciones de los ecos de pared posterior y de la discontinuidad, al mover el palpador desde una zona sana a otra defectuosa.

Una discontinuidad muy grande de forma arbitraria, se puede explorar, siempre que sea visible la variación de la altura del eco de indicación de pared posterior que seguirá siendo regular, disminuyendo a la mitad de su valor cuando el eje del haz toca el borde de la discontinuidad.

Si no se dispone de la indicación del eco de pared posterior, una discontinuidad plana y perpendicular al haz ultrasónico, no presentara problemas de determinación de su extensión, ya que será suficiente fijarse en la variación de la altura de la indicación, la cual se reducirá al 50 % de su valor máximo cuando el eje del haz irradie el limite o contorno de la discontinuidad.

FIG 52 Altura relativa de eco para una grieta y una cavidad.



Fuente: Curso Básico de Ultrasonido, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela.

Cap. 7

8.3.3.2. Discontinuidades menores que la sección del haz ultrasónico.

La determinación del tamaño de la discontinuidad se lleva a cabo comparando su eco de indicación con los de otros reflectores ensayados en las mismas condiciones. Estos pueden ser:

- Tipo A: discontinuidades naturales conocidas, de idéntica naturaleza y morfología.
- Tipo B: discontinuidades artificiales, de morfología similar a la esperada.
- Tipo C: reflectores de forma de disco circular plano.

Dado que las discontinuidades naturales presentan, además, superficies irregulares y rugosas y que no siempre su superficie reflectante principal es perpendicular al haz ultrasónico, darán lugar, a indicaciones de altura menor que la de un disco circular de igual superficie reflectante perpendicular al haz ultrasónico. Es decir, el tamaño de una discontinuidad natural, menor que la sección del haz ultrasónico, será igual o mayor que el de un disco circular perpendicular al haz ultrasónico, presente en la misma muestra, cuyo eco de cómo resultado una indicación de igual altura.

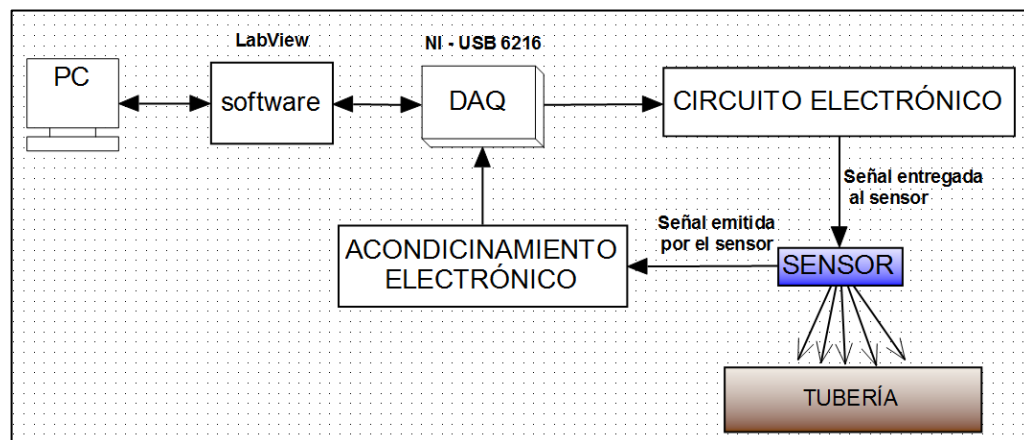
Se hace notar la excepción, poco probable, de que la superficie de la discontinuidad natural forme un espejo cóncavo, en cuyo caso el haz reflejado se focalizará, pudiendo dar lugar a un eco más fuerte que el correspondiente a una discontinuidad equivalente en forma de disco circular plano.

9. PROTOTIPO EXPERIMENTAL DESARROLLADO

En capítulos anteriores se describió en detalle las características de las ondas acústicas, los métodos y técnicas implementadas en la inspección por ultrasonido, los tipos de transductores y la forma teórica en que se genera y se propaga el haz ultrasónico en el sensor. Todas estas características y este conocimiento nos permiten tener un bagaje más amplio en el uso del ultrasonido como método predictivo en el mantenimiento de tuberías metálicas.

Se muestra un diagrama de bloques general del prototipo desarrollado para tener una idea global del proyecto.

FIG 53 Diagrama de bloques general



Fuente: Autores

9.1 DESCRIPCIÓN DEL MONTAJE FISICO

El montaje ilustrado en la figura se divide en los siguientes subsistemas:

1. Sistema a inspeccionar (tubería)
2. Sistema emisor-receptor de variables físicas (sensor)
3. Sistema amplificación y acondicionamiento (placa electrónica)
4. Sistema de potencia (fuente)
5. Sistema procesador-receptor de señales (tarjeta)
6. Sistema de interface con el usuario (Software)

FIG 54 Componentes del montaje



Fuente: Autores.

9.2. SISTEMA EMISOR-RECEPTOR DE VARIABLES FÍSICAS.

9.2.1. Transductores miniatura de haz angular. Se usan principalmente acompañados de zapatas, para reducir la amplitud de la señal y buscar desaparecer el eco de la superficie frontal de la pieza, además de refractar el haz ultrasónico a un ángulo específico. Su diseño permite fácil escaneada en las dos trayectorias (transmisión y recepción del haz) y proporciona una corta distancia de enfoque; su utilización se basa en la inspección de la integridad de las soldaduras y en la detección de defectos.

FIG 55 Palpador de haz angular C543-SM



Fuente: Autores.

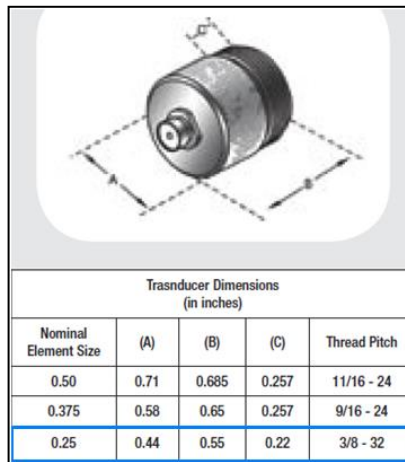
Ventajas:

1. Se pueden utilizar con zapatas para inspección de materiales en caliente.
2. Disponibles para inspeccionar superficies con curvaturas.
3. Mejor relación señal – ruido y proporciona excelente resistencia al desgaste.
4. Se pueden personalizar consiguiendo ángulos de retractación no comunes.

El espectro de frecuencia de un palpador ultrasónico depende, en parte, del nivel de amortiguación propio de cada palpador, y en los valores de frecuencia expresados en MHz. En nuestro caso 5 MHz.

En el recuadro azul de la siguiente figura encontramos las dimensiones y el paso de rosca de nuestro palpador de haz angular mini Screw-In.

FIG 56 Dimensiones del transductor



Fuente: Olympus, Ultrasonic transducers

El transductor utilizado es de escaneo tipo centrascan, el cual nos proporciona una excelente sensibilidad y una alta relación señal – ruido en materiales de difícil penetración.

9.2.2. Cable de conexión. El ensayo se realizó por el método de pulso eco, para la conexión se utilizó un conector dual de tipo BNC y Microdot, compatible con el palpador piezoeléctrico de cristal único emisor – receptor, en nuestro caso transductor miniatura de haz angular Screw-In de referencia C543 – SM.

La selección de nuestro palpador está determinada por el material a inspeccionar, diámetro del palpador y el ancho de banda adecuado. Puesto que nuestro

material a inspeccionar es un acero de grano fino entonces el rango de frecuencias a utilizar es de 5 a 7.5 MHz, como necesitamos una alta sensibilidad (habilidad de detectar defectos pequeños) y poca penetración se escogió un palpador de diámetro pequeño y de ancho de banda amplio, lo cual nos mejora la resolución (habilidad de separar ecos provenientes de dos o mas reflectores que están muy cerca entre sí).

FIG 57 Cable microdot-bnc

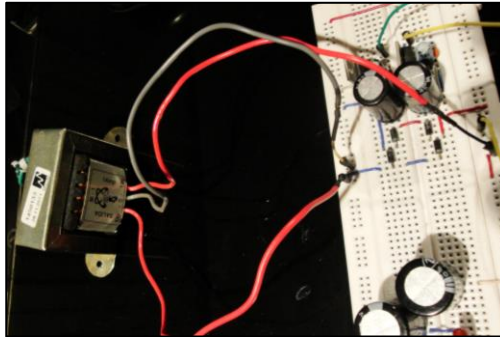


Fuente: Autores

9.3. SISTEMA ELECTRÓNICO DE ACONDICIONAMIENTO

Consideramos que una de las partes más tediosas y complicadas de este proyecto fue esta etapa, debido al alto grado de complejidad que requieren los tratamientos de señales, con mucho esfuerzo y dedicación se logró acondicionar la señal, para que el sensor pudiera excitarse y para poder visualizar señales tan pequeñas y con ruidos tan grandes y complejos. Este fue un proceso de mucha investigación y asesoría externa. En la siguiente imagen se observa el proceso de acondicionar el voltaje necesario para alimentar todo el circuito, consta de un transformador con salida de 12 v y su respectivo circuito electrónico. La imagen se presenta con fin informativo de ilustrar el proceso que se llevó a cabo.

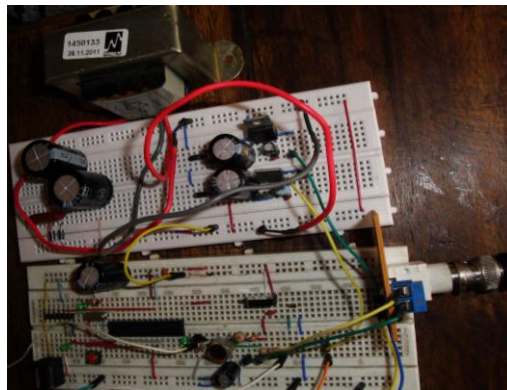
FIG 58 Fuente de potencia 1:1



Fuente: Autores

Seguidamente, después de pruebas y errores se logró acondicionar la señal que sería enviada al sensor, señal de gran voltaje a baja corriente, teniendo en cuenta de no sobrepasar los valores establecidos por el fabricante del transductor que son los 125mW, para no sobrecalentar el piezoeléctrico y llegar a despolarizarlo. En la imagen se ilustra el acondicionamiento y de igual forma se presenta a modo de observación del proceso desarrollado.

FIG 59 Acondicionamiento señal hacia el sensor

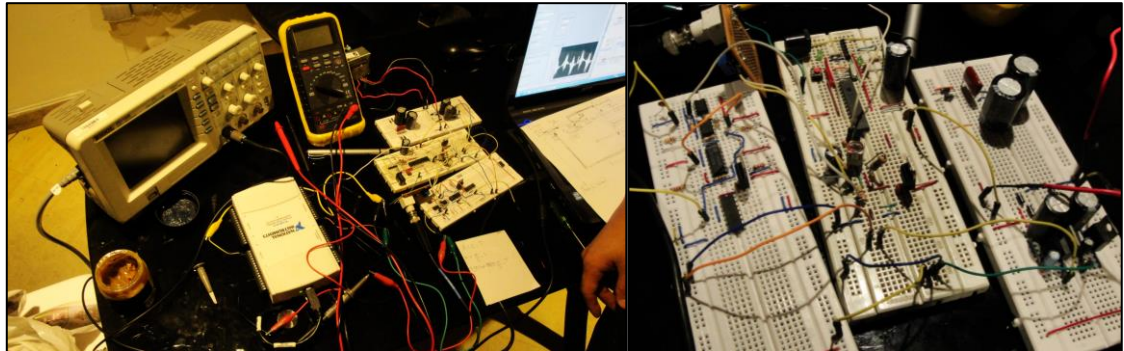


Fuente: Autores

Con el sensor ya en funcionamiento se implementó un sistema que acondicionara la señal que llegaba del sensor, siendo esta una de las partes más críticas y duras de lograr, debido a la alta frecuencia que se maneja y los ruidos grandes que se

obtienen. De forma similar se ilustra la imagen del resultado que se tenía hasta este entonces.

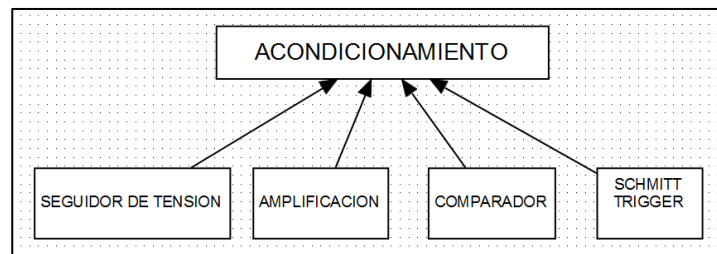
FIG 60 Acondicionamiento total



Fuente: Autores

En resumen el acondicionamiento consta de etapas que son; Un seguidor de tensión, amplificación, comparador y Schmitt trigger.

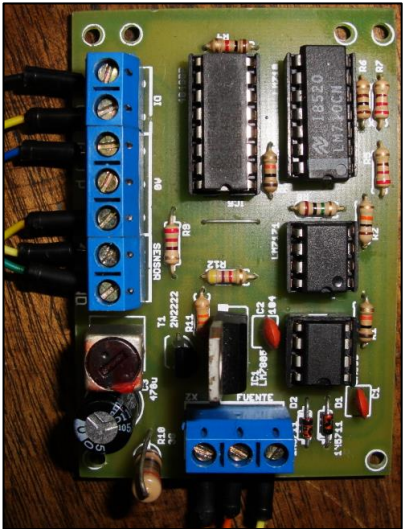
FIG 61 Acondicionamiento



Fuente: Autores

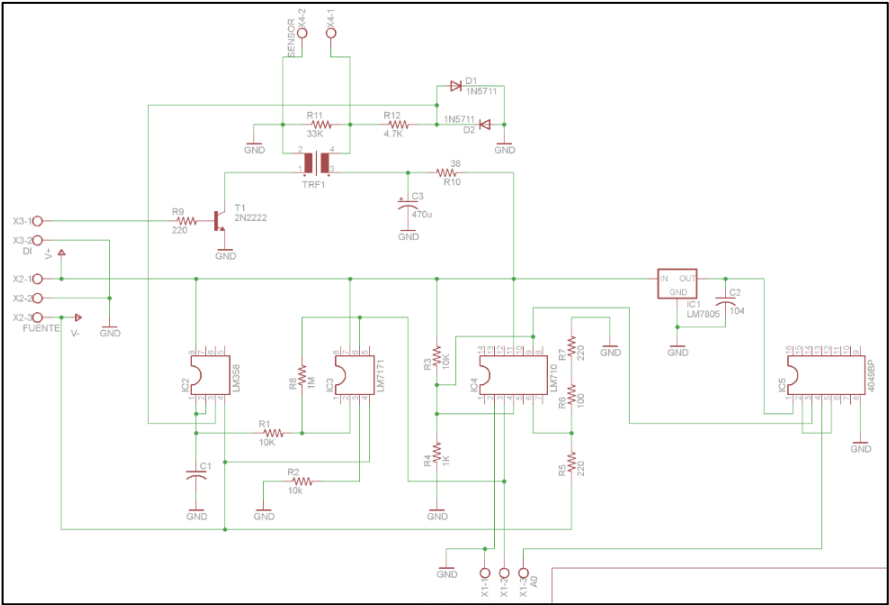
9.3.1 Placa electrónica de acondicionamiento. La siguiente imagen muestra el resultado del diseño desarrollado y su respectivo circuito, consta de integrados como; un seguidor de tensión LM358, un amplificador LM7171, un comparador LM710CN y un Schmitt trigger CD4049UBC, también posee un transformador pequeño y un transistor con sus respectivas resistencia y condensadores.

FIG 62 Placa electrónica de acondicionamiento



Fuente: Autores

FIG 63 Esquemático del acondicionamiento



Fuente: Autores

9.4 SISTEMA DE POTENCIA

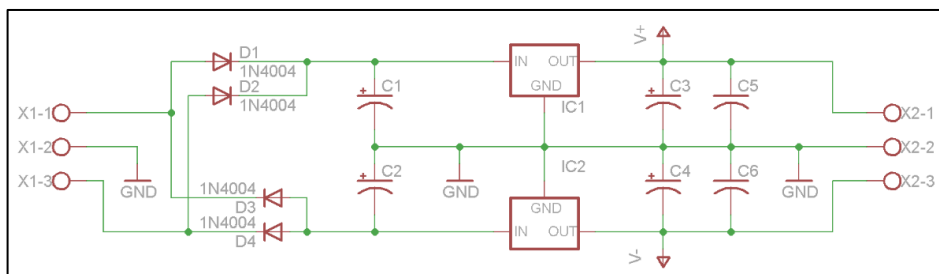
9.4.1 Placa electronica de potencia. El prototipo consta de una sistema de potencia, de +12V y -12V cc para la alimentacion de todo el circuito.

FIG 64 Placa electronica de potencia



Fuente: Autores

FIG 65 Esquematico de la fuente de potencia

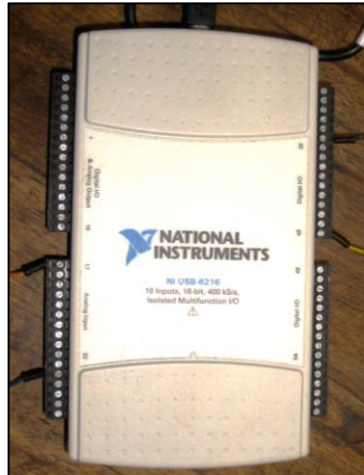


Fuente: Autores

9.5. SISTEMA PROCESADOR-RECEPTOR DE SEÑALES

9.5.1. Tarjeta National Instruments. Se usó la tarjeta NI USB-6216 para la generación y adquisición de señales.

FIG 66 Tarjeta ni usb-6216



Fuente: Autores

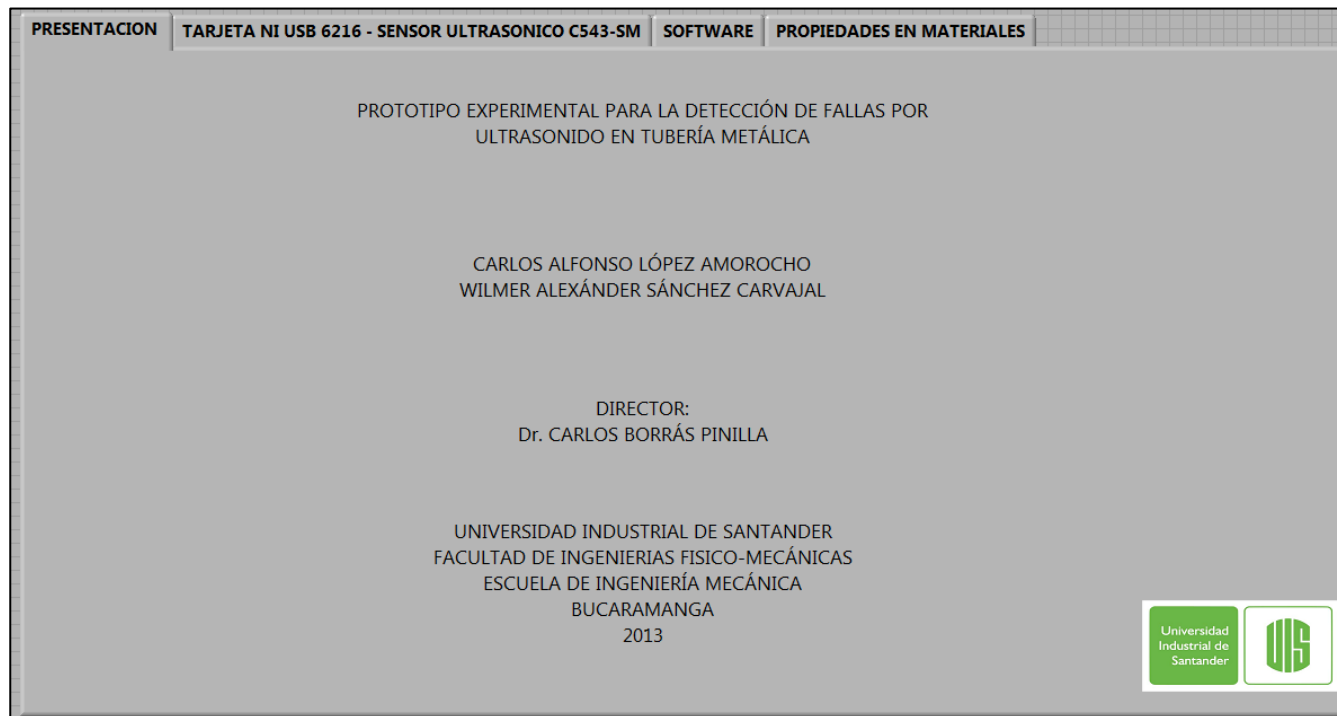
9.6. SISTEMA DE INTERFASE CON EL USUARIO

9.6.1 Software desarrollado. Se desarrolló un programa en LabView, para la adquisición y generación de señales. La generación generada va dirigida hacia unos integrados electrónicos para su posterior tratamiento el cual se explicó en la sección anterior, estas señales se generaron por las salidas digitales de la tarjeta y las señales obtenidas (información otorgada por el sensor, ecos) se ingresaron por los puertos análogos de la tarjeta NI USB 6216.

El software consta de unas pestañas que brindan la información necesaria al usuario en el momento de realizar las inspecciones. Una pestaña de presentación, otra pestaña sobre la información del sensor y la tarjeta implementada, junto con

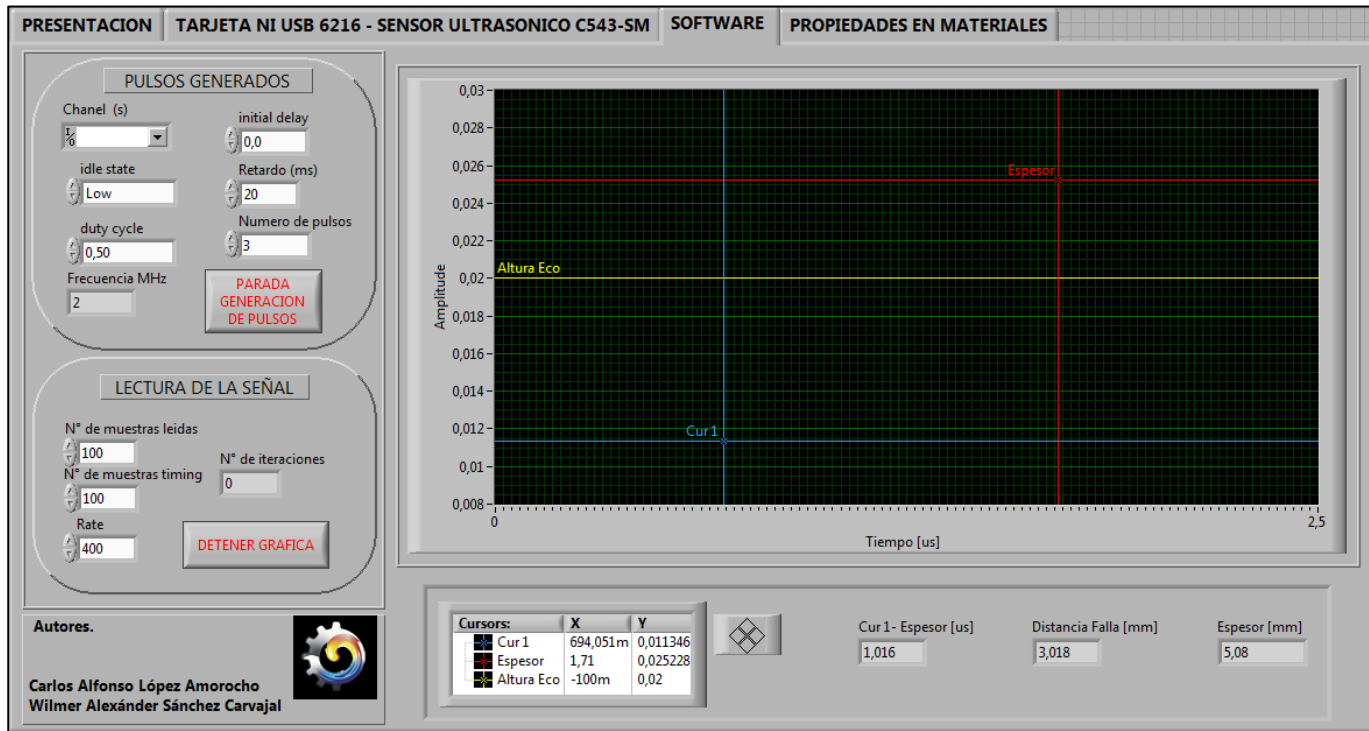
una pestaña interna sobre algunas propiedades de ciertos materiales y finalmente una pestaña que permite guardar los datos para su posterior análisis.

FIG 67 Pestaña1: presentación



Fuente: Autores

FIG 68 Pestaña 3: Software



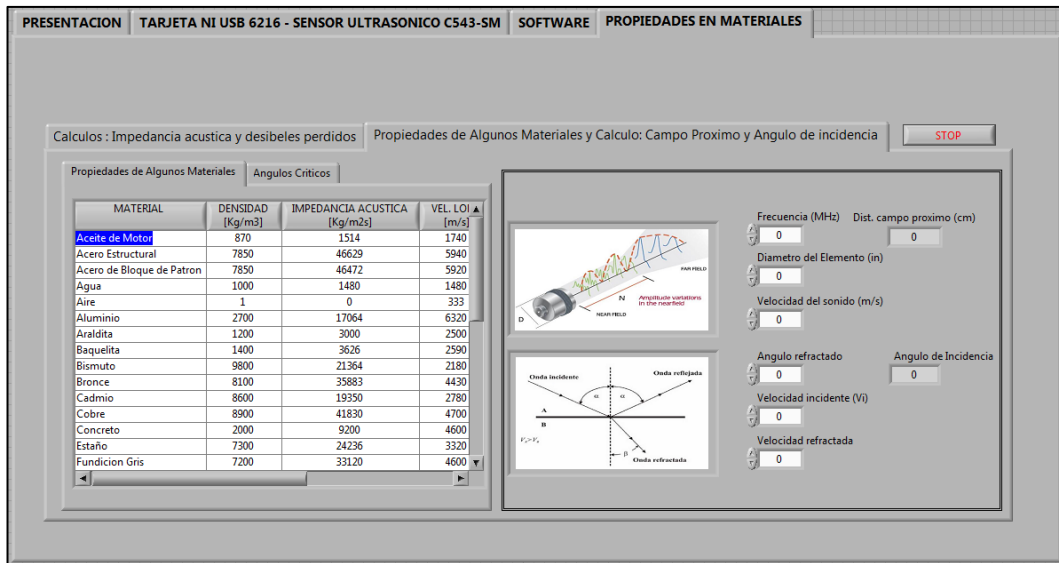
Fuente: Autores

9.6.2. Elementos que conforman la pestaña 3.

1. **Pestañas.** En ella se encuentra el contenido aplicativo del proyecto; hoja de presentación, instrumentos y elementos utilizados en el prototipo con sus características y disposición de los mismos, el software con sus respectivos resultados.
2. **Pantalla.** Permite la visualización de las ondas percibidas por medio del sensor ultrasónico, se visualiza su energía vs tiempo.
3. **Tablero de control.** En el tablero encontramos parámetros para el control del pulso generado en el sensor ultrasónico; ancho de pulso, periodo entre pulso y pulso, amplitud del pulso. Este pulso repercutirá en la respuesta que se capte con dicho sensor.
4. **Perilla para el control del cursor.** Permite el desplazamiento de los dos cursores presentes en la pantalla, se pueden visualizar en líneas de color amarillo. Este desplazamiento se puede realizar mediante la perilla o desplazándolo manualmente en la pantalla.
5. **Botón de parada de la imagen.** Botón para detener la imagen y poder hacerle su análisis, al final será necesario iniciar el sistema desde los comandos principales.

9.6.3. Pestaña 4: Propiedades en materiales. Me brinda una información de las propiedades de algunos materiales; densidades, impedancias, velocidades acústicas, ángulos críticos, módulos de elasticidad y en las otras dos pestañas me permite realizar cálculos de parámetros importantes en el uso de ultrasonido; campo cercano, impedancia del material, dB perdidos y recibidos, ángulos de incidencia.

FIG 69 Propiedades en materiales

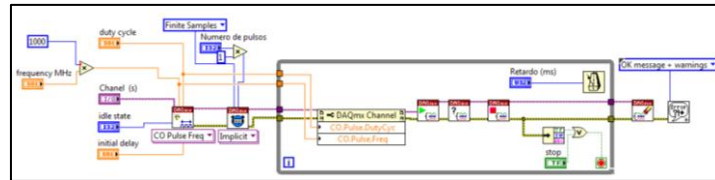


Fuente: Autores

9.6.4. Descripción del software - diagrama de bloques. En el encontramos la base fundamental del programa, las conexiones entre los diferentes elementos que componen el software. De igual forma se encuentra dividido en subsistemas que son:

- 1. Ciclo generador de pulsos.** Mediante la aplicación de funciones avanzadas de LabView podemos encontrar tres funciones importantes para la generación, adquisición, timing, y lectura; DAQmxCreateChannel, DAQmxTiming, DAQmxStartTask, etc. Estas funciones me permiten crear el ciclo de generación de pulsos finitos, por las salidas digitales, con control como se ilustra en el panel frontal y su respectivo ciclo whileloop para la repetición del proceso.

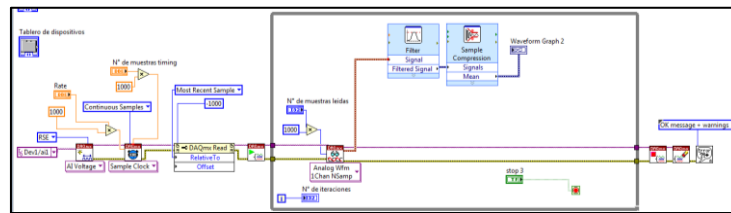
FIG 70 Ciclo generación de pulsos.



Fuente: Autores

- 2. Ciclo de lectura de los datos.** Este subsistema consta de las funciones DAQmx de LabView mostradas en el ciclo anterior, pero en este caso configuradas para la adquisición de los datos por entradas análogas, con su respectivo control de lectura ilustrado en el panel frontal.

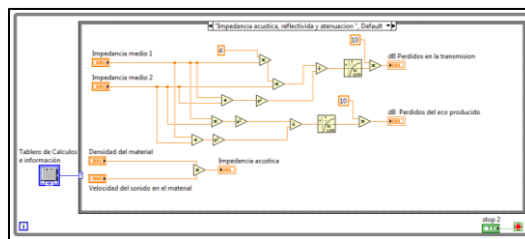
FIG 71 Ciclo lectura de datos.



Fuente: Autores

- 3. Ciclo para el cálculo de propiedades en materiales.** Este ciclo ilustra la programación para el cálculo de algunas propiedades como se ilustró anteriormente en el panel frontal.

FIG 72 Ciclo cálculo de propiedades

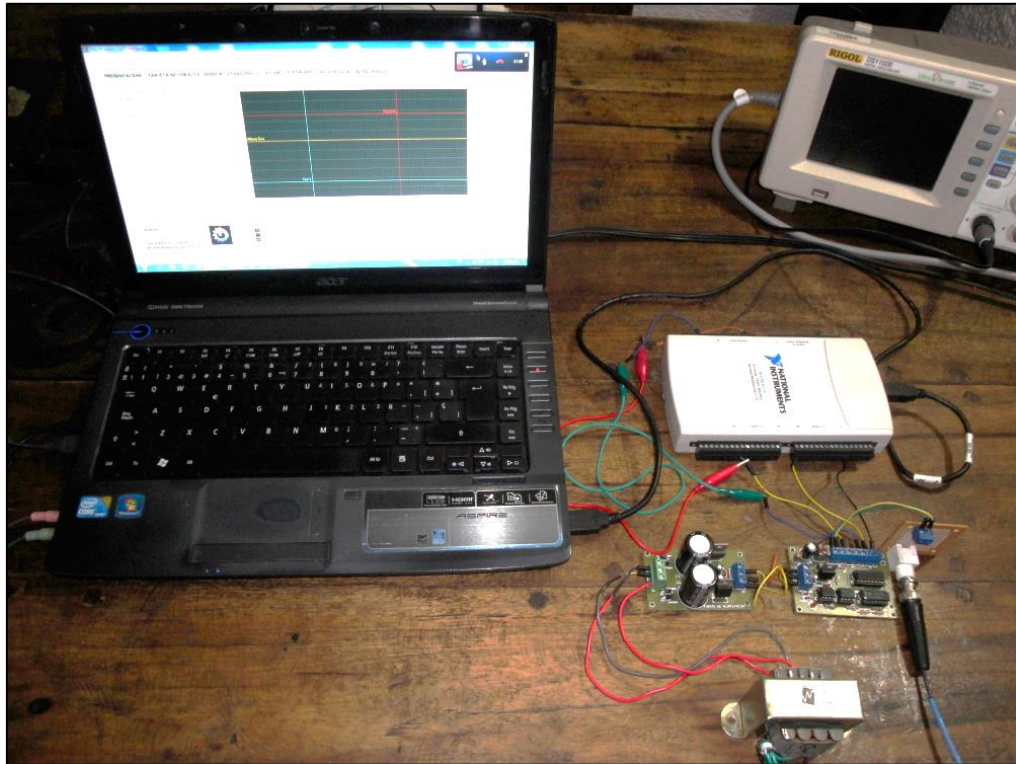


Fuente: Autores

9.8 RESULTADO GENERAL DEL PROTOTIPO DISEÑADO

El resultado obtenido después de toda la investigación se ilustra en la siguiente foto, con todos los sistemas presentes nombrados anteriormente, tanto software como hardware, esta es la imagen general de todo lo desarrollado en este proyecto.

FIG 73 Sistema general diseñado



Fuente. Autores

9.7 METODOLOGIA IMPLEMENTADA PARA LA INSPECCIÓN

La detección de discontinuidades en piezas fundidas o de acero mediante la inspección ultrasónica se logra, por generación de ondas sonoras de alta frecuencia, que son transmitidas desde la superficie exterior o superior hasta la interna o posterior. En el desarrollo del trabajo se usó la técnica de pulso-eco, para determinar la presencia y ubicación de las discontinuidades; las piezas pueden ser inspeccionadas no sólo por longitud de discontinuidades aisladas tales como grietas, vacíos e inclusiones, sino también por regiones de segregaciones, porosidades y tamaño de grano grueso.

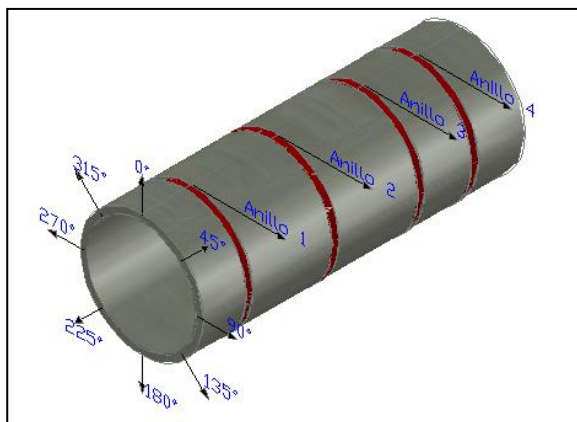
Para la inspección se utilizó una tubería de acero de grano fino de longitud 30 [cm], de diámetro 4.5 [in] y con un espesor de pared de 6,6 [mm], a la cual se le realizó la medición en cuatro anillos distribuidos en los 30 [cm] de longitud, los resultados de la inspección se muestran en cada anillo a 45° hasta completar la circunferencia, tal como se observa en la figura:

FIG 74 Tubería de acero de grano fino



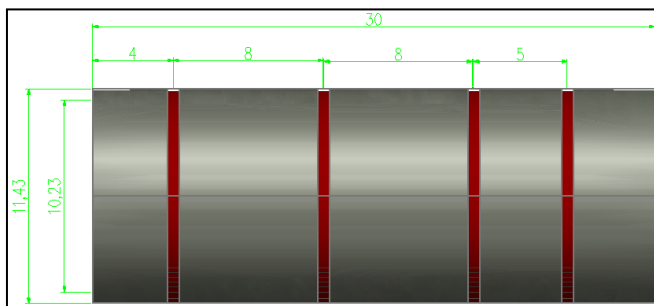
Fuente: Autores.

FIG 75 Distribución para la toma de datos



Fuente: Autores.

FIG 76 Distribución de los anillos



Fuente: Autores.

9.7.1. Modo de visualización de los resultados. En nuestro trabajo se utilizó el modo de presentación tipo A – Scan obtenido por la interfaz construida con el software LabView, mostrando los valores de tiempo en el eje de las abscisas (eje horizontal) y los datos de variación en la amplitud de la señal en el eje de las ordenadas (eje vertical).

Para esta gráfica, la altura de los ecos de indicación o "picos" representa la intensidad del haz ultrasónico reflejado. Igualmente, la línea base de tiempo, como su mismo nombre lo indica, proporciona el tiempo que tarda el haz ultrasónico en

ser reflejado, por lo que para un valor de velocidad conocido es posible conocer los valores en términos de distancia o profundidad de penetración.

FIG 77 Muestreo de datos en presentación A-Scan



Fuente: Autores.

En el ejemplo mostrado en la Figura, se observan tres picos o ecos de indicación que corresponden; el número (1) al eco inicial, el número (2) al eco de discontinuidad y el número (3) al eco de pared posterior, de la pieza mostrada en la Figura.

Mediante la presentación A-scan se puede determinar las dimensiones de discontinuidad, la profundidad o la distancia desde la superficie, sea la de contacto o la posterior, a la discontinuidad, la divergencia del haz ultrasónico y otros factores. Las indicaciones de los ecos que se producen por un voltaje alterno, se representan, en general, rectificadas, es decir, con deflexión de la base de tiempo en un sólo sentido.

10. PRUEBAS Y RESULTADOS

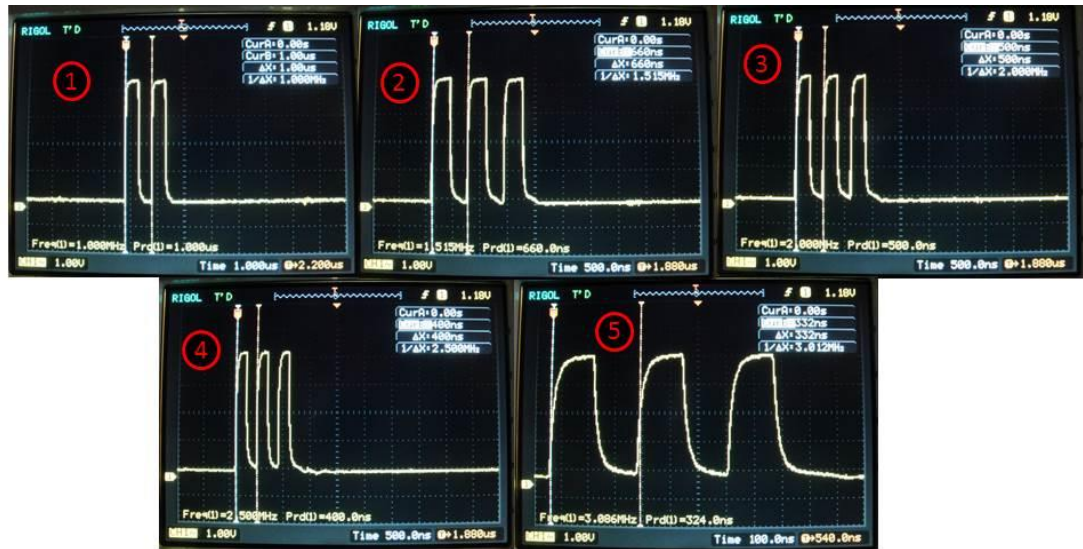
10.1 PRUEBAS REALIZADAS CON PROTOTIPO EXPERIMENTAL CONSTRUIDO

Para la realización de la prueba experimental se indujeron tres fallas ubicadas a diferentes longitudes de la tubería y cada una de diferente dimensión, con el fin de facilitar la presentación funcional de nuestro prototipo, en primer lugar se ajustan los parámetros de medición en el software desarrollado, como lo es la frecuencia a la que se generan los pulsos, retardó entre los trenes de pulsos, ancho de pulso, numero de pulsos, y definir el canal de salida.

Como describió en el capítulo 9 sección 9.7 metodología experimental para la inspección, se realizaron cuatro anillos de inspección en la tubería con tomas de datos cada 45 grados, siempre y cuando no se detecte una falla a un ángulo diferente. Usando la grasa Mobil lux EP2 como medio acoplante se inicia el barrido sobre la tubería y a continuación se presentan las gráficas más relevantes de los resultados obtenidos de cada anillo.

Se realizaron pruebas con la tarjeta a frecuencias de; 1 MHz, 1,5 MHz, 2 MHz y 2,5 MHz, 3 MHz y se observó que después de los 2 MHz los pulsos se distorsionan.

FIG 78 Trenes de pulsos



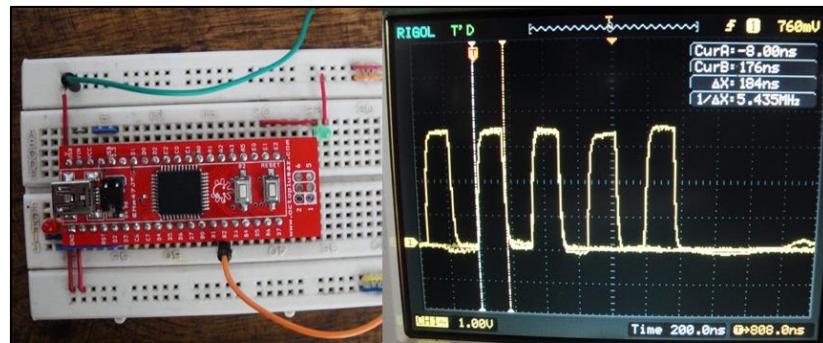
Fuente: Autores.

1. Pulsos a $F=1$ MHz
2. Pulsos a $F=1,5$ MHz
3. Pulsos a $F=2$ MHz
4. Pulsos a $F=2,5$ MHz
5. Pulsos a $F=3$ MHz

De la gráfica anterior se observó a frecuencias superiores a 2 MHz los pulsos pierden su forma, por lo cual tenemos una limitante debido a la tarjeta.

Como no fue posible generar pulsos después de los 2 MHz, implementamos la generación de pulsos a través de un PIC 18F47J53 y se observó que perfectamente podíamos sacar la señal hasta los 5 MHz. En la siguiente grafica ilustramos esos pulsos.

FIG 79 Pic 18f47j53 frecuencia 5 mhz



Fuente: Autores

Se implementó el microchip PIC 18F47J53 en remplazo de la tarjeta para la generación de pulsos con el fin de poder trabajar a una frecuencia de 5 MHz, pero no se obtuvieron buenos resultados debido a las limitaciones de lectura de la tarjeta, esto producía ruidos más apreciables sin poder observar algún cambio en la medición.

Se seleccionó 2MHz como frecuencia de operación posteriormente la respuesta del sensor se amplifico a través de un LM7171 y se visualizó los ecos producidos por transductor, ilustrados en la siguiente gráfica.

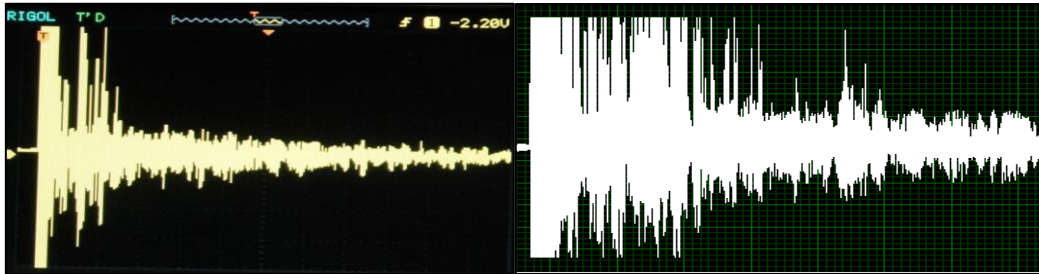
FIG 80 Ecos amplificados producido por el transductor sin contacto con la superficie.



Fuente: Autores

De la gráfica se observa que el transductor no emite ninguna respuesta mientras no se encuentra en contacto con la superficie, como era de esperarse. Se presenta la respuesta obtenida en el osciloscopio (izquierda) y en la pantalla del software en desarrollo (derecha).

FIG 81 Ecos amplificados producido por el transductor en contacto con la superficie.



Fuente: Autores

De la gráfica se observa que el sensor está respondiendo al contacto con la superficie como era de esperarse. Se presenta la respuesta obtenida en el osciloscopio (izquierda) y la obtenida por el software en desarrollo (derecha).

Mediante el uso de los circuitos electrónicos nombrados anteriormente se acondiciono la señal de estos ecos para una mejor visualización y se ajustaron algunos parámetros de hardware para la frecuencia de 2 MHz.

Después de un arduo trabajo y teniendo un conocimiento más preciso sobre las capacidades de nuestros equipos y elementos decidimos trabajar a la máxima frecuencia que nos proporciona la tarjeta 2 MHz, definiendo esta frecuencia se procedió a realizar las pruebas bajo la metodología anteriormente descrita y sus resultados obtenidos se presentan a continuación.

FIG 82 Modo para la medición



Fuente: Autores

Las pruebas realizadas a continuación se realizaron a una frecuencia de 2MHz las mediciones se hicieron en 4 anillos, cada 45°.

FIG 83 Anillos de inspección



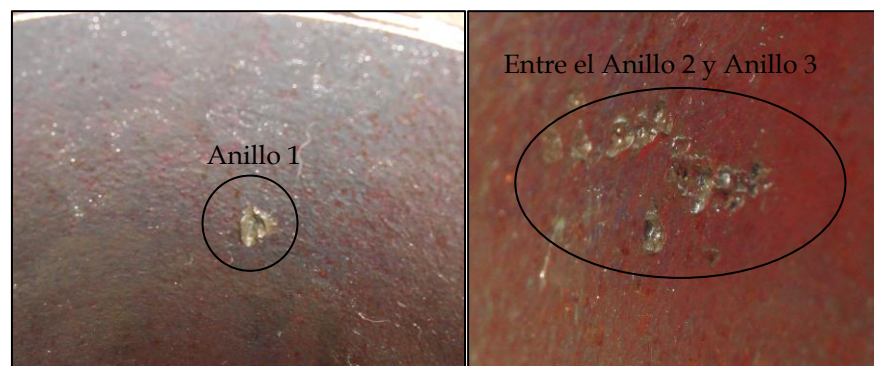
Fuente: Autores

Para el cálculo del espesor se utilizó la siguiente formula, también descrita en capítulos anteriores.

$$Espesor = \frac{Velocidad\ del\ sonido * tiempo}{2}$$

Se dispuso de una tubería de acero de grano fino, con velocidad del sonido en el material de 5940 (m/s) y espesor de 6 [mm], se indujo tres fallas ubicadas en los anillos de inspección con el fin de poder detectarlas.

FIG 84 Fallas incididas



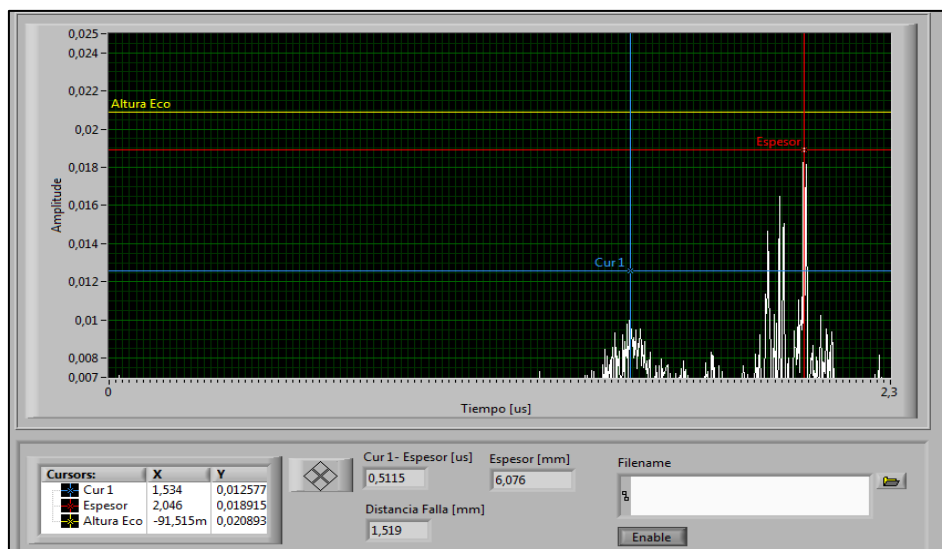
Fuente: Autores

Teniendo presente lo dicho anteriormente se realizan las pruebas y se debe aclarar que se hicieron las 12 mediciones por cada anillo, dando un total de 48 mediciones, se comparan los resultados obtenidos de los espesores por el software y el equipo Epoch XT, para establecer cierta garantía de lo desarrollado.

Realizando múltiples mediciones, experimentalmente se pudo establecer la altura media que producía el eco de fondo, siendo este una referencia que permita garantizar que la medida se encuentre en el rango aceptable y a su vez como referencia para establecer los ecos de falla importantes.

Por cuestiones de análisis solo se muestran las imágenes más representativas y el resto de resultados se tabulan.

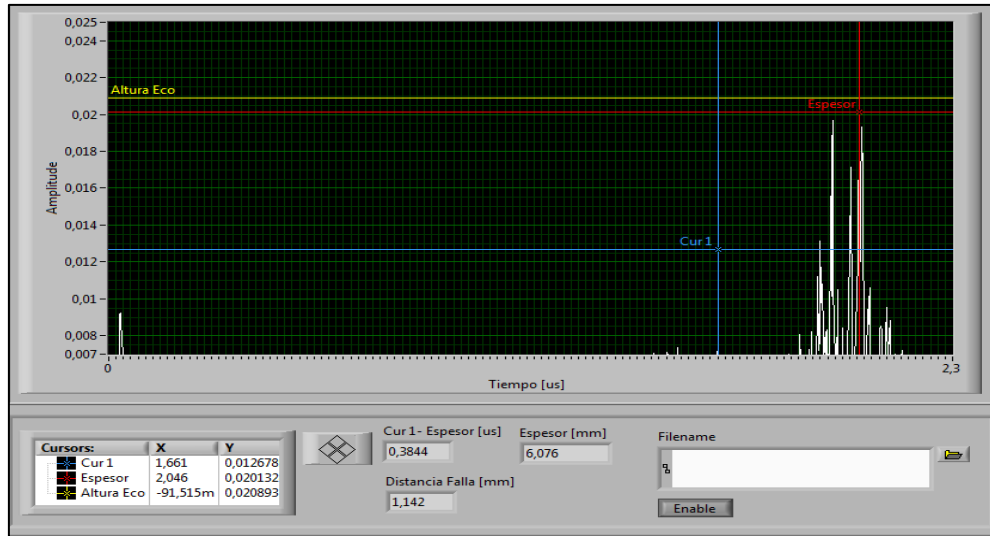
FIG 85 Anillo 1 a 0°



Fuente: Autores

De la gráfica 84, se observa el eco de fondo presente a 6,11 [mm] en el anillo 1 al 0 °, vemos que no diverge mucho de nuestro valor teórico de 6 mm. También se observa que en su trayecto se presentan varios picos apreciables y el más lejano se detecta a 1,589 [mm] de la superficie interna, siendo este la grieta más lejana y de baja intensidad en la tubería, en esta misma se observa como el eco de fondo cae debido a un eco de gran intensidad producido por alguna discontinuidad defecto próximo a la superficie interna.

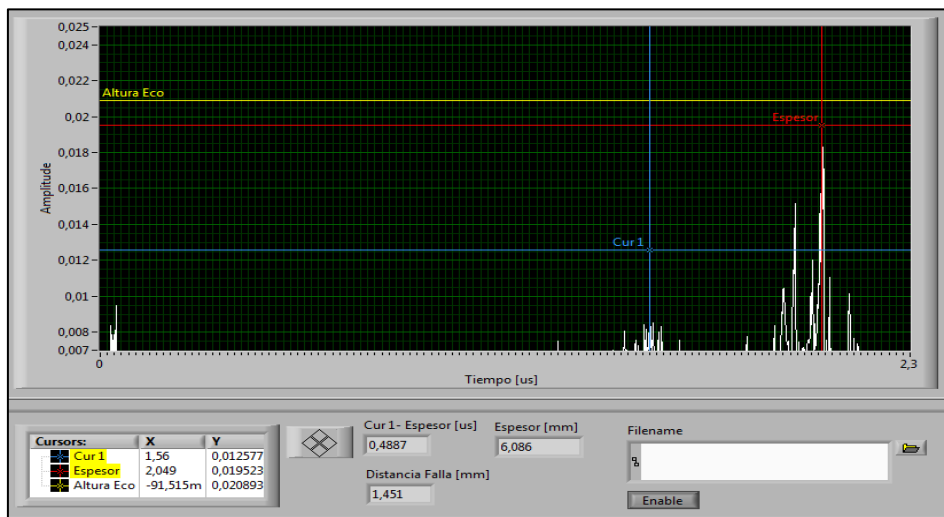
FIG 86 Anillo 2 a 45°



Fuente: Autores

De la gráfica 85, se observa el eco de fondo se presenta a los 6,086 [mm] en el anillo 2 a los 45°, vemos que no diverge mucho de nuestro valor teórico de 6 [mm]. No se observa nada relevante en la gráfica, pudiendo establecer que en la sección no se encuentran discontinuidades.

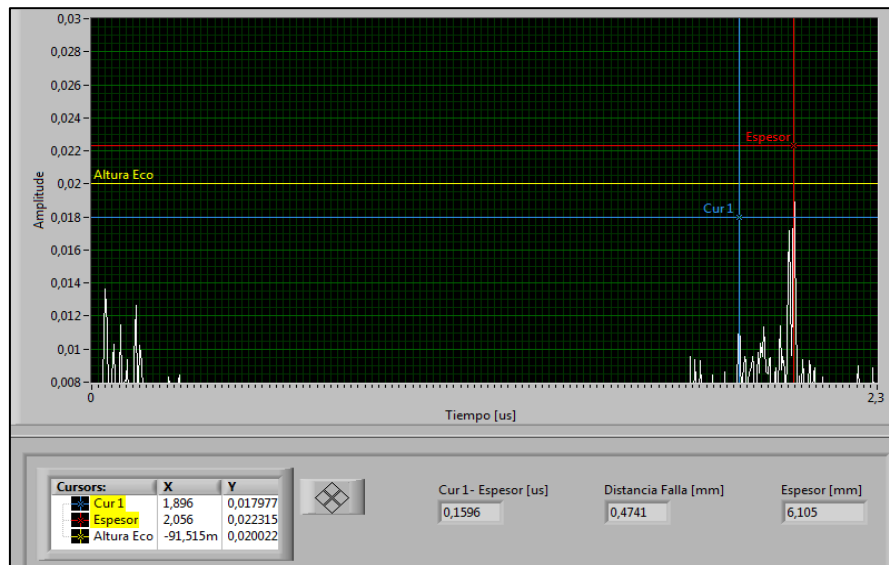
FIG 87 Anillo 3 a 115°



Fuente: Autores

De la gráfica 86, se observa el eco de fondo el cual se presenta a 6,105 [mm] en el anillo 3 a los 115°, vemos que no diverge de nuestro valor teórico de 6 [mm]. Se observa que se presenta un eco importante cercano a la superficie interna a los 1,458 [mm] y ecos de menor amplitud en zonas más profundas, esto es el reflejo de la gran cantidad de incrustaciones que se hicieron en cierta zona, como se observa en la fig. 83 derecha.

FIG 88 Anillo 4 a 180°



Fuente: Autores

De la gráfica 88, se observa el eco de fondo el cual se presenta a 6,105 [mm] en el anillo 4 a 180°, vemos que no diverge mucho de nuestro valor teórico de 6 [mm]. Se observa algunas anomalías cercanas a la superficie interna de la tubería, las cuales no tienen mayor relevancia. Se establece que en esta zona no se presentan discontinuidades importantes.

10.2 Pruebas con el Equipo Epoch XT

Como complemento a la investigación se realizaron las pruebas a la misma tubería con el equipo Epoch XT, utilizando un palpador de haz recto de 1,25 MHz de frecuencia con el que se muestra los datos obtenidos al realizar el barrido en los anillos estipulados anteriormente, con el fin de observar y comparar los resultados en la inspección, mediante un equipo comercial para de alta gama.

El Epoch XT es un detector de defectos por ultrasonidos portátil de avanzada, que cuenta con numerosas funciones estándares de medición, incluyendo un emisor de ondas cuadradas ajustable, filtros digitales de banda estrecha y de banda ancha seleccionables, una gama de ganancias de 0 a 110 dB, las funciones de memoria y de mantenimiento de picos y una frecuencia de repetición de impulsos (PRF) ajustable.

El diseño del detector de defectos por ultrasonidos EPOCH XT ofrece una gran flexibilidad de inspección en condiciones rigurosas. Asimismo, es compacto, está dotado de herramientas eficaces de detección y medición de defectos, cuenta con una pantalla brillante LCD en colores, funciona con diferentes tipos de baterías y posee una gran capacidad de tratamiento de datos y numerosas herramientas *software*. Por si fuera poco, su caja sellada responde a las exigencias de la norma IP67.

FIG 89 Equipo Epoch XT y elementos utilizados



Fuente: Autores.

Las siguientes gráficas nos muestran el espectro presente en el equipo Epoch XT, el cual se encuentra configurado para medición de espesores, para este caso se realizaron las pruebas sobre la tubería con el fin de mostrar las fallas inducidas, mediante la variación de espesor, en la parte izquierda de la gráfica se observa el campo muerto, seguido a esto vemos el primer pico que representa el eco de fondo siendo este el espesor de la tubería de 6 [mm].

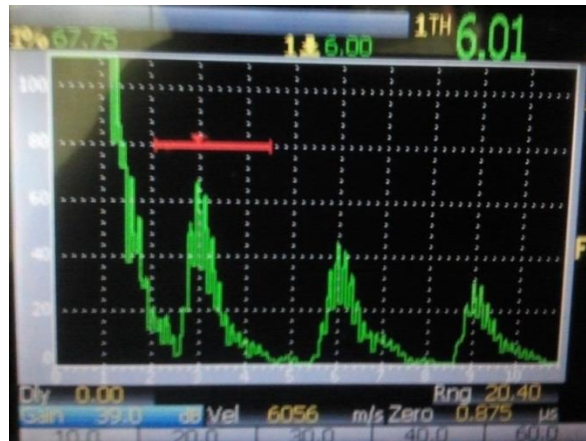
FIG 90 Epoch XT anillo 1 a 0°



Fuente: Autores

De la gráfica se observa un espesor de 5.57 [mm] en el anillo 1 a 0°, lo cual es indicación de una falla puesto que el espesor diverge en 0,43 [mm] del espesor real, esto nos sirve como referencia para la figura 84, estableciendo presencia de fallas en esta zona.

FIG 91 Epoch XT anillo 2 a 45°



Fuente: Autores.

De la gráfica se observa un espesor de 6,01 [mm] presente en el anillo 2 a 45°, dando como resultado el espesor real de la tubería, esto es referencia para la figura 85, que nos indica una zona libre de fallas relvantes.

FIG 92 Epoch XT anillo 3 a 115°



Fuente: Autores.

De la gráfica se observa un espesor de 5.53 [mm], presente en el anillo 3 a 115°, esto nos indica la presencia de una falla debido a la variación del espesor que diverge en 0,47 [mm] del espesor real, esto nos sirve como referencia para la figura 86 y 87, estableciendo la presencia de fallas en esta zona.

FIG 93 Epoch XT anillo 4 a 180°



Fuente: Autores.

De la gráfica se observa un espesor de 6,00 [mm], presente en el anillo 4 a 180°, esto nos dice que es una zona libre de fallas, siendo la referencia para la figura 88, donde no se observan fallas relevantes.

En la siguiente figura se compilan los resultados de las pruebas con el prototipo y el equipo Epoch XT, los datos en negrilla son los mostrados en las gráficas, ya que estos presentan picos superiores a un 20% como lo dice la norma, respecto al eco de fondo.

FIG 94 Resultados generales

RESULTADOS DE LA INSPECCIÓN: Distancia en [mm] desde la superficie interna hasta la falla mas relevante.											
Posición angular		0°	45°	90°	115°	180°	225°	270°	315°	Promedio espesor [mm]	Promedio espesor Epoch XT [mm]
Anillo 1	Eco fondo 1	6.115	6.098	6.101	6.035	6.044	6.102	6.111	6.086	6.087	6.115
	Prueba 1	2.874	2.8	2.81	2.85	2.73	1.45	1.69	2.00		
	Prueba 2	2.86	2.8	2.82	2.85	2.74	1.45	1.69	1.97		
Anillo 2	Eco fondo 1	6.085	6.086	6.075	6.082	6.070	6.061	6.067	6.074	6.075	6.086
	Prueba 1	1.01	1.026	0.98	1.05	1.045	1.023	1.025	1.035		
	Prueba 2	1.01	1.025	0.98	1.05	1.045	1.023	1.025	1.035		
Anillo 3	Eco fondo 1	6.054	6.1	6.098	6.105	6.078	6.067	6.067	6.069	6.077	6.105
	Prueba 1	0.365	2.15	1.865	0.367	0.964	0.456	0.324	0.563		
	Prueba 2	0.356	2.12	1.867	2.051	0.97	0.51	0.301	0.558		
Anillo 4	Eco fondo 1	6.087	6.071	6.079	6.084	6.105	6.088	6.083	6.080	6.085	6.105
	Prueba 1	0.518	0.483	1.452	1.72	0.4741	0.571	0.322	0.353		
	Prueba 2	0.523	0.482	1.423	1.72	0.475	0.57	0.33	0.353		

Fuente: Autores

CONCLUSIONES

Se diseñó y se construyó un prototipo experimental, para la detección de fallas en tubería metálica, realizando las pruebas sobre una tubería de diámetro de 4,5 [in] y espesor de 6, [mm], a la cual se le indujeron tres fallas en diferentes anillos y a distintos grados.

El prototipo desarrollado consta de una tarjeta National Instruments USB 6216 encargada de emitir y recibir las señales. Se debe tener claro que el prototipo tiene una limitante en su frecuencia debido a la tarjeta implementada, su máxima frecuencia para la generación de los trenes de pulsos es de 2,25 [MHz], por esta razón se implementó 2 [MHz] como frecuencia de operación, siendo esta frecuencia aceptable para los requerimientos y cumplimientos de nuestros objetivos planteados desde su inicio. Se debe resaltar la gran complejidad que conlleva trabajar a frecuencias tan elevadas y niveles de tensión tan pequeños. Debido a estos dos factores, se necesitaron dispositivos u elementos con capacidad de operación muy superiores a la frecuencia deseada y amplificadores que permitan la visualización en el manejo de estas señales, por ejemplo el uso de un microchip LM7171, que me permite trabajar a muy altas velocidades y amplificar señales en óptimas condiciones. Teniendo presente que se usaron todos los elementos necesarios para un buen tratamiento de señales, se trató al máximo de reducir el ruido presente en el circuito, siendo este un problema muy complejo, el cual se logró reducir al máximo para poder visualizar los resultados deseados.

El prototipo diseñado generar pulsos de gran voltaje a 500 [ns] en alta y baja durante 1 [us], cada 20 [ms], dándole tiempo suficiente para la obtención de los ecos. Un aspecto negativo es el no poder ser tan flexible en el uso de la

frecuencia, debido al límite que nos entrega la tarjeta en su generación y adquisición de datos. Si se contara con algún dispositivo más robusto o el uso de microcontroladores como el 18f47J53 capaz de trabajar hasta 48 [MHz] como se intentó dar solución y se mostraron los pulsos perfectamente trabajando a 5 [MHz], como era lo deseado, aclaramos que no se optó por esta solución, porque no disponíamos de un dispositivo de lectura a esta velocidad que pudiéramos acoplar con el software desarrollado en LabView y por cuestiones técnicas no conocíamos la respuesta a esta frecuencia de cada uno de los elementos ya implementados y dispuestos en su momento, de todas formas se hicieron pruebas sin poder observar resultados importantes.

En los resultados obtenidos mostrados en las figuras y en la tabla general se observa que los ecos de fondo del grosor de la tubería no divergen mucho respecto a los resultados obtenidos por un equipo certificado y calibrado como lo es el implementado para la medición del espesor en este proyecto, el Epoch XT, ya que es un proyecto de investigación y un prototipo desarrollado se usó el equipo para brindar un grado óptimo de certeza en los resultados obtenidos.

El software desarrollado me brinda la información técnica de los dispositivos implementados así como información sobre propiedades de materiales, en el también podemos definir nuestros canales tanto de salida como entrada, los retardos entre pulsos, el número de pulsos, para una frecuencia predeterminada.

En la práctica, para una buena detección de fallas es necesario tener en cuenta varios factores como lo son la orientación el tipo de discontinuidad analizar, además de la dispersión del haz ultrasónico la cual depende de la microestructura del material y su geometría, debido a que la amplitud de la señal ultrasónica recibida desde la discontinuidad, es relativa a las dimensiones del área reflectora y siempre perpendicular al haz ultrasónico de dicha discontinuidad, de la buena selección del sensor y la técnica a implementar, de la buena calibración de estos factores depende la precisión de las discontinuidades, etc.

Este trabajo abre las puertas para investigaciones más profundas hacia sistemas de mayor complejidad con el fin de encontrar defectos más pequeños como los poros, conociendo la posibilidad de construir un equipo para detección de fallas a un bajo costo económico.

Como una última conclusión después de una ardua investigación, podemos afirmar que a corto plazo la técnica de inspección por ultrasonido convencional, será obsoleta debido a la gran evolución que ha tenido el ultrasonido. Actualmente se desarrollan y se usan técnicas en la industria como el Phased Array, que me proporciona resultados más rápidos, más confiables, con un grado menor de dificultad en el análisis de resultados e inspección, pero el uso de técnicas como esta implican un mayor costo económico en la inversión, con esto no se pretende dar como descartado el estudio del ultrasonido convencional, ya que sin el conocimiento de él no sería posible el uso de técnicas como el Phased Array.

RECOMENDACIONES

Debido a las limitantes mencionadas anteriormente es recomendable poder trabajar con tarjetas más robustas como una DSP, esto nos brinda características para la adquisición y generación de estas señales de tan elevada frecuencia, con esto se podrían solucionar los problemas de ruido y poder obtener resultados más óptimos, se podría trabajar a frecuencias más elevadas, pero el gran inconveniente es su precio, implementar esto elevaría los costos del proyecto, se debería hacer un estudio de costo beneficio que esto implicaría.

Si el costo es un parámetro que limita el uso de estas tarjetas, el uso de microcontroladores como lo definimos anteriormente, sería una solución, pero se necesitaría de un estudio más profundo y un conocimiento mayor en electrónica, los resultados podrían ser buenos pero a un costo más económico.

Por otra parte es importante siempre verificar el circuito de potencia previamente antes de conectarlo para garantizar que se estén trabajando sobre los rangos de voltaje y corriente que necesitan los elementos de la tarjeta electrónica de acondicionamiento, una mala polarización en la fuente podría ocasionar que los elementos fallen. Siempre se debe desenergizar el circuito al hacer cualquier conexión por protección.

Se recomienda el uso de algún acoplante adecuado para la inspección como puede ser una grasa o glicerina, además se recomienda el uso de una zapata para el sensor, ya que esta reduce el desgaste en el sensor producido por el contacto entre las superficies, evitando que con el tiempo se pueda despolarizar el piezoeléctrico, esto también ayuda a mantener un mejor contacto con la pieza y reduce la amplitud de la señal pudiendo disminuir o desaparecer el eco de la superficie frontal de la pieza.

BIBLIOGRAFÍA

- **C. DESIMONE, P. KATCHADJIAN, M. TACCHIA.** Aplicación de Ondas Guiadas. IV Conferencia Panamericana de END Buenos Aires. Av. General Paz 1449, 1650 San Martín. Octubre de 2007.
- **CARLOS RAMÓN GONZALES BOHÓRQUEZ,** Especialización en Gerencia de Mantenimiento, Mantenimiento Preventivo, Universidad Industrial de Santander, Escuela de Ingeniería Mecánica, Bucaramanga, 2010
- **CORPORACIÓN PARA LA INVESTIGACIÓN DE LA CORROSIÓN.** Informe implementación metodología DG-ICDA. Piedecuesta, Colombia, 2010.
- **CURSO DE ULTRASONIDO BÁSICO.** Facultad de ingeniería, universidad central de Venezuela.
- **DOMINGUEZ** Luis Vergara, **CASTILLO** Jorge Gonzales, **ROIG** Ignacio Bosch, **HERNANDEZ** Jesús Molina, **RICOS** Ramón Miralles, Tratamiento de señales Ultrasonicas en ensayos no destructivos.
- **EULOGIO SANTOS DE LA CRUZ, NESTOR CANCINO VERA, JULIO YENQUE DEDIOS, DAVID RAMIREZ MORALES, MAXIMO PALOMINO PEREZ,** El Ultrasonido y su aplicación, Industrial Data, enero-junio, año/vol. 8, número 001, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima-Perú.

- **FORERO GARCIA**, Edwin Francisco. Diseño de un prototipo para la medición de espesores usando ultrasonido. Tesis de Maestría escuela de ingeniería eléctrica, electrónica y de telecomunicaciones, Facultad de ingenierías físico-mecánicas, UIS 2005.
- **FRANCISCO GOMEZ, KASPAR ALTHOEFER AND LAKMAL D. SENEVIRATNE**, Modeling of Ultrasound Sensor for Pipe Inspection, international Conference on Robotics & Automation, Taipei, Taiwan, Department of Mechanical Engineering, King's College London, Strand, London WC2R 2LS, United Kingdom, September 14-19, 2003.
- **GONZALES BOHÓRQUEZ**, Carlos Ramón. Especialización en Gerencia de Mantenimiento, Mantenimiento Preventivo. Escuela de Ingeniería Mecánica, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2010.
- **INSTRUMENTS**, National. Manual del Usuario NI USB 621x. Junio de 2007. Disponible en: ni.com.
- **JIMÉNEZ GÓMEZ**, John y **LOAIZA CORREA**, Humberto. Detección y caracterización de defectos en tuberías metálicas en pruebas ultrasónicas por inmersión. Universidad Autónoma de Occidente, Cali, Colombia, El Hombre y la Máquina, núm. 34, enero-junio, 2010,
- **JIRADO**, Nidia. Curso Ultrasonido Nivel I. Technical Partner Group S.A, Bogotá, Julio de 2010.
- **LLOG**, S.A, DE C.V. Ultraman Interactive. GE Inspección Technologies, Cuitláhuac No. 54, Aragón la Villa, México D.F.

- **MOROS DURAN**, Adriana Catalina y **TORRES BENÍTEZ**, Elkin Yesid. Aplicación de la técnica de ultrasonido para la estimación de la pérdida de espesor en la superficie externa de una pieza tubular. Tesis escuela de ingeniería metalúrgica y ciencia de materiales, Facultad de ingenierías físico-químicas, UIS 2009.
- **NDT**, Olympus. Ultrasonic transducers technical notes. Panametrics-NDT, 2006. Disponible en: www.olympusNDT.com.
- **NORMA ASTM**. Standard Practice for Ultrasonic Examination of Metal Pipe and Tubing. Designación: E213-04.
- **PEDROUZO TELLO**, José Antonio y **QUINTERO CARRERO**, Nelson Federico. La Aplicación del Ultrasonido como Tecnología Complementaria en un Plan de Mantenimiento Predictivo. Tesis del departamento de ingeniería mecánica y de los materiales, Universidad de Sevilla, Escuela Universitaria Politécnica, Septiembre 2009
- **W. A. K. DEUTSCH, P. SCHULTE, M. JOSWIG, R. KATTWINKEL, KARL DEUTSCH** NDT, Automatic Inspection of Welded Pipes with Ultrasound, Instruments, Sensors & Systems, Wuppertal, Germany.
- **WALTER G. CADY**, Piezo-Electric Terminology, Institute of Radio Engineers, Volume 18, Number 12, December, 1930.

ANEXOS

ANEXO A. PROTOCOLO PARA LA DETECCION DE FALLAS

El siguiente protocolo pretende instruir al operario en aspecto que se deben tener presentes para una buena medición, las condiciones iniciales de operación, algunos datos importantes en la medición, datos normativos y algunas sugerencias. Estos aspectos se presentan enumerados en su respectivo orden así:

1. Se debe tener un conocimiento previo sobre la geometría que se desea inspeccionar, en nuestro caso tuberías de acero de grano fino de 7 mm de espesor y 4.5 in de diámetro. Es importante este aspecto debido a que cada geometría presenta resultados característicos definidos (en este proyecto no se desarrolló la caracterización de estas fallas, solo se enfoca en la detección) y aún más importante conocer la distancia a la cual el haz ultrasónico hará el barrido, para este caso 7mm.
2. Antes de empezar con la inspección, previamente se debe acondicionar la superficie lo más limpia posible, cualquier impureza puede mostrar resultados incoherentes, una buena condición en la superficie también garantiza una vida más larga del sensor, debido a que rugosidades considerables generan un desgaste más rápido en el transductor.
3. Luego de acondicionar la superficie y tener un conocimiento previo de las dimensiones del objeto a medir (en nuestro caso la tubería), se procede a conectar el transductor al dispositivo electrónico implementado, mediante el cable microdot, seguido conectamos la tarjeta National Instruments USB 6216 y energizamos el circuito electrónico.
4. Se desarrolló un software en LabView, el cual permite generar la trama de pulsos necesarias para excitar el transductor, se debe tener presente que esta tarjeta como máximo genera pulsos a 2 MHz, después de esta frecuencia se distorsiona mucho los pulsos generados. El programa consta de varias pestañas que brindan información al usuario y en la pestaña software se encuentran los parámetros de instrucción con la tarjeta, los resultados se presentan en la gráfica y mediante los cursores podemos ubicar los picos importantes para nuestro análisis.

La salida de los pulsos se realiza por el puerto 38 Digital I/O, con su respectiva tierra, puerto 48 Digital I/O.

La adquisición de los datos se hace por el puerto 17 Analog Input, con su respectiva tierra, puerto 28 Analog Input.

Se configuran los siguientes parámetros de entrada:

Canal: Dev1/ctr0

Frecuencia: 2 MHz

Retardo: 2 ms

De esta forma ya estamos listos para realizar las mediciones.

5. Se debe usar una grasa como acoplante entre el transductor y la superficie a inspeccionar, se debe hacer una presión constante hasta visualizar cualquier cambio en la pantalla, se realiza un movimiento lento y constante.

Recomendaciones:

1. Según la norma ASTM E1901-97 establece que para picos que no superen el 20% del eco de fondo, se pueden descartar ya que no representan ningún relevante para la determinación de la falla.
2. Si se requiere una interpretación correcta sobre la discontinuidad, es necesario recurrir al empleo de otros ensayos no destructivos y así complementar la información obtenida.
3. Si se requiere hacer análisis en espesores mayores, es necesario hacer la calibración del equipo ya que se necesitaría un mayor frecuencia para hacer barridos más largos, esto implica adecuar la escala en la grafica para una mejor visualización, para este caso no es posible hacerlo con esta tarjeta, también se debe disponer del sensor necesario para esa frecuencia y posiblemente hacer algunos cambios en el circuito electrónico.

ANEXO B. PROPIEDADES DEL SONIDO EN LOS MATERIALES.

MATERIAL	DENSIDAD (ρ) (kg/m ³)	IMPEDANCIA ACUSTICA ($Z \times 10^3$) (kg/m ² seg)	VELOCIDAD LONGITUDINAL (V) (m/seg)	VELOCIDAD TRANSVERSAL (V) (m/seg)	MODULO DE ELASTICIDAD (E) (N/cm ²)	MODULO DE RIGIDEZ (G x 10 ⁷) (N/cm ²)
ACEITE DE MOTOR	870	1.514	1.740	-----	-----	-----
ACERO ESTRUCTURAL	7.850	46.629	5.940	3.250	213.320	82.916
ACERO DE BLOQUE PATRON	7.850	46.472	5.920	3.250	212.977	82.916
AGUA	1.000	1.480	1.480	-----	-----	-----
AIRE	1	0	333	-----	-----	-----
ALUMINIO	2.700	17.064	6.320	3.130	70.758	26.452
ARALDITA	1.200	3.000	2.500	-----	-----	-----
BAQUELITA	1.400	3.626	2.590	-----	-----	-----
BISMUTO	9.800	21.364	2.180	1.100	31.524	11.858
BRONCE	8.100	35.883	4.430	1.500	98.400	36.405
CADMI0	8.600	19.350	2.780	2.160	50.103	19.350
COBRE	8.900	41.830	4.700	2.260	122.701	45.458
CONCRETO	2.000	9.200	4.600	-----	-----	-----
ESTAR0	7.300	24.236	3.320	1.670	54.181	20.359
FUNDICION GRIS	7.200	33.120	4.600	2.650	126.570	50.562
GLICERINA	1.300	2.496	1.920	-----	-----	-----
GOMA DURA	1.200	2.760	2.300	-----	-----	-----
HIERRO COLADO	6.900	24.150	3.500	2.260	78.375	33.396
MAGNESIO	1.700	9.809	5.770	3.050	41.311	15.814

MATERIAL	DENSIDAD (ρ) (kg/m ³)	IMPEDANCIA ACUSTICA ($Z \times 10^3$) (kg/m ² seg)	VELOCIDAD LONGITUDINAL (V) l (m/seg)	VELOCIDAD TRANSVERSAL (V) t (m/seg)	MODULO DE ELASTICIDAD (E) (N/cm ²)	MODULO DE RIGIDEZ (G x 10 ²) (N/cm ²)
METAL DURO	11.000	74.800	6.800	4.000	434.878	176.000
NIQUEL	8.800	49.544	5.630	2.960	201.852	77.102
NYLON	1.100	2.882	2.620	1.080	3.586	1.283
ORO	19.300	62.532	3.240	1.200	78.958	27.792
PLATA	10.500	37.800	3.600	1.590	73.202	26.545
PLATING	21.400	84.744	3.960	1.670	166.137	59.682
PLEXIGLAS	1.180	3.221	2.730	1.430	6.327	2.413
POLIETILENO	940	2.200	2.340	925	2.264	804
PORCELANA	2.400	13.440	5.600	3.500	69.354	29.400
PLOMO	11.400	24.624	2.160	700	16.102	5.586
PVC DURO	1.400	3.353	2.395	1.060	4.336	1.573
TUNGSTENO	19.100	104.286	5.460	2.620	354.110	131.110
URANIO	18.700	59.840	3.200	-----	-----	-----
VIDRIO	3.600	15.336	4.260	2.560	57.443	23.593
ZINC	7.100	29.607	4.170	2.410	103.031	41.238

ANEXO C. ÁNGULOS CRÍTICOS PARA ENSAYOS POR EL MÉTODO DE CONTACTO DIRECTO Y EL MÉTODO DE INMERSIÓN.

MATERIAL	MÉTODO DE CONTACTO DIRECTO INTERFASE PLÁSTICO - MATERIAL		MÉTODO DE INMERSIÓN INTERFASE AGUA - MATERIAL	
	PRIMER ÁNGULO CRÍTICO	SEGUNDO ÁNGULO CRÍTICO	PRIMER ÁNGULO CRÍTICO	SEGUNDO ÁNGULO CRÍTICO
ACERO ESTRUCTURAL	27,36°	57,14°	14,43°	27,09°
ACERO DE BLOQUE PATRON	27,46°	57,14°	14,48°	27,09°
ALUMINIO	25,59°	60,72°	13,54°	28,22°
BRONCE	38,04°	> 90°	19,52°	44,28°
CADMIO	79,12°	> 90°	32,17°	80,63°
COBRE	35,51°	> 90°	18,35°	40,91°
ESTAÑO	55,31°	> 90°	26,47°	62,40°
FUNDICIÓN GRIS	36,40°	> 90°	18,77°	33,95°
HIERRO COLADO	51,26°	> 90°	25,02°	40,91°
MAGNESIO	28,24°	63,52°	14,86°	29,03°
NIQUEL	29,01°	67,26°	15,24°	30,00°
ORO	57,41°	> 90°	27,18°	> 90°
PLATA	49,32°	> 90°	24,27°	68,56°
PLATINO	43,58°	> 90°	21,95°	62,40°
PORCELANA	29,18°	51,26°	15,32°	25,02°
TUNGSTENO	30,00°	> 90°	15,73°	34,39°
VIDRIO	39,85°	> 90°	20,33°	35,32°
ZINC	40,90°	> 90°	20,79°	37,89°

ANEXO D. TARJETA NATIONAL INSTRUMENTS USB-6216



Ventas
Colombia
01 8000 513680
orders@ni.com

NI USB-6216

DAQ MIO de la Serie M Aislado de 16 Bits, 400 kS/s, Energiza

- 16 entradas analógicas (16 bits, 400 kS/s)
- 2 salidas analógicas (16 bits a 250 kS/s), 32 E/S digitales, dos contadores de 32 bits
- Aislamiento CAT I de 60 V para seguridad y precisión mejoradas; conectividad de señal integrada
- NI signal streaming para transferencia de datos bidireccional a alta velocidad en USB; la versión OEM está disponible
- Compatible con LabVIEW, ANSI C/C++, C#, Visual Basic .NET y Visual Basic 6.0
- El software de NI-DAQmx y software interactivo NI LabVIEW SignalExpress LE para registro de datos



Información General

El módulo USB-6216 de National Instruments es un módulo de adquisición de datos (DAQ) multifunción de la Serie M energizado por bus USB y optimizado para una precisión superior a velocidades de muestreo más altas. Ofrece 16 entradas analógicas, velocidad de muestreo de 400 kS/s, dos salidas analógicas, 32 líneas de E/S digital, cuatro rangos de entrada programable (± 0.2 V a ± 10 V) por canal, disparo digital y dos contadores/temporizadores. El módulo ofrece aislamiento CAT I de 60 V para seguridad y precisión mejoradas.

El módulo NI USB-6216 está diseñado específicamente para aplicaciones móviles o con restricciones de espacio. La instalación plug-and-play minimiza el tiempo de configuración y montaje mientras que la conectividad directa con terminal de tornillo mantiene los precios bajos y simplifica las conexiones de señal. Este producto no requiere potencia externa.

El NI USB-6216 también cuenta con la nueva tecnología NI Signal Streaming la cual permite transferencia de datos bidireccional a alta velocidad parecida a DMA a través del bus USB. Para mayor información sobre NI Signal Streaming, consulte la sección de Recursos.

Cada módulo cuenta con una versión OEM. Consulte la sección de recursos o use el menú de la izquierda para obtener información técnica y precios.

Software Controlador

El software de servicios de medida y controlador NI-DAQmx le dan interfaces de programación y configuración fáciles de usar con características como el DAQ Assistant para ayudar a reducir el tiempo de desarrollo. Busque la información en sección de Recursos para aprender más sobre software o descargar un controlador. Los dispositivos de la Serie M no son compatibles con el controlador Tradicional NI-DAQ (Legado).

Software de Aplicación

Cada tarjeta de adquisición de datos de la Serie M incluye una copia del software de registro de datos NI LabVIEW SignalExpress LE así usted puede adquirir, analizar y presentar datos rápidamente sin programación. Además de LabVIEW SignalExpress, los dispositivos de adquisición de datos de la Serie M son compatibles con las siguientes versiones (o posteriores) de software de aplicación - LabVIEW 7.1, LabWindows™/CVI 7.x o Measurement Studio 7.x. Los dispositivos de adquisición de datos de la Serie M también son compatibles con Visual Studio .NET, C/C++ y Visual Basic 6.

La marca LabWindows se usa bajo una licencia de Microsoft Corporation.

Especificaciones

Documentos con Especificaciones

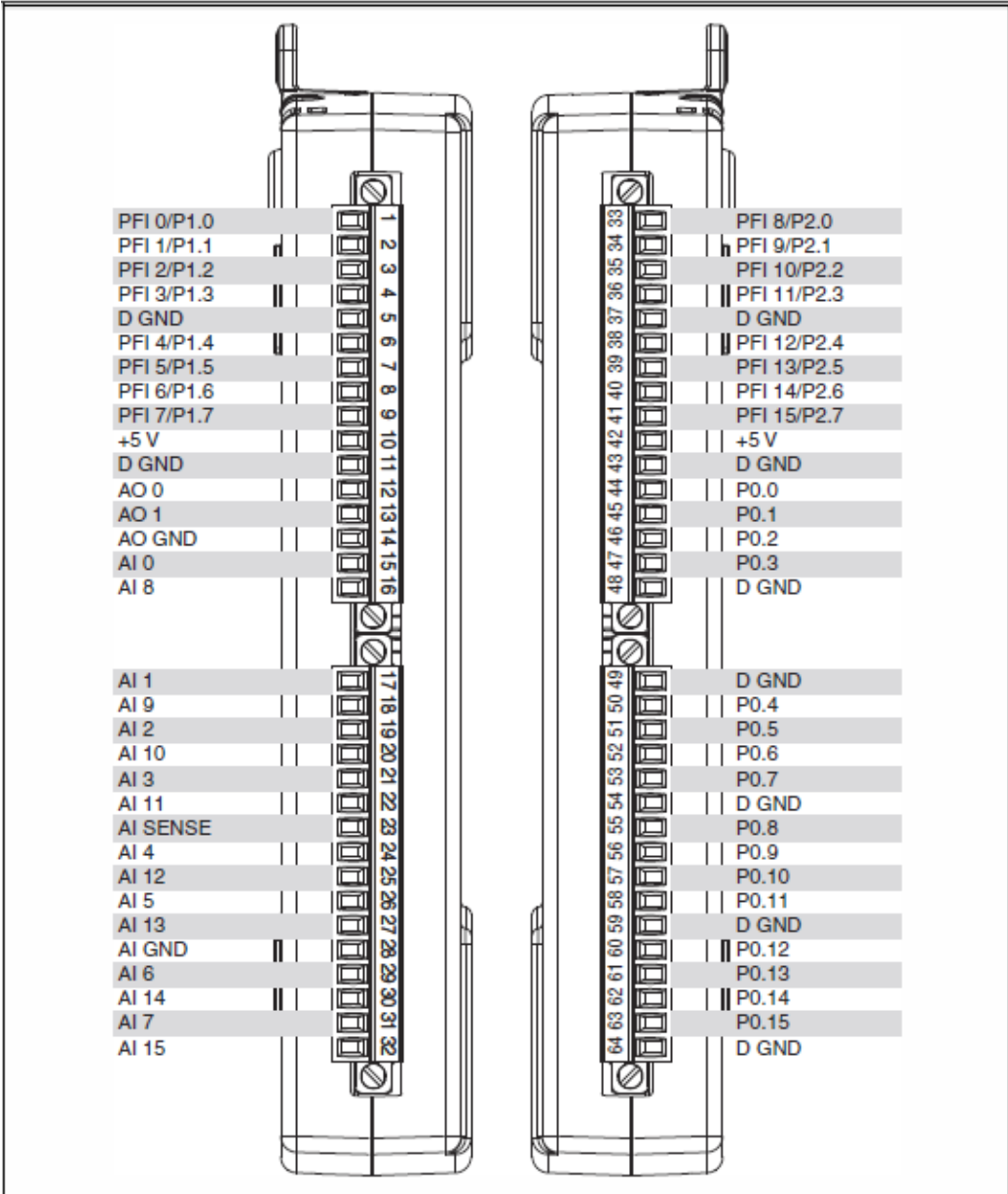
- Especificaciones
- Hoja de Especificaciones

Resumen de Especificaciones

General	
Producto	USB-6216
Familia de Productos	DAQ Multifunción
Formato Físico	USB
Número de Parte	780108-01
Sistema Operativo/Objetivo	Windows
Familia de Productos DAQ	Serie M
Tipos de Medida	Codificadores de cuadratura , Voltaje
Tipo de Aislamiento	Aislamiento entre Bancos
Compatibilidad con RoHS	Sí
Entrada Analógica	
Canales	16 , 8
Canales de una sola terminal	16
Canales Diferenciales	8
Resolución	16 bits
Velocidad de Muestreo	400 kS/s
Máx. Voltaje de Entrada Analógica	10 V
Rango de Voltaje Máximo	-10 V , 10 V
Precisión Máxima del Rango de Voltaje	2.69 mV
Sensibilidad Máxima del Rango de Voltaje	91.6 μ V
Rango de Voltaje Mínimo	-200 mV , 200 mV
Mínima Precisión del Rango de Voltaje	0.088 mV
Mínima Sensibilidad del Rango de Voltaje	4.8 μ V
Número de Rangos	4
Muestreo Simultáneo	No
Memoria Interna	4095 muestras
Salida Analógica	
Canales	2

Resolución	16 bits
Máx. Voltaje de Salida Analógica	10 V
Rango de Voltaje Máximo	-10 V , 10 V
Precisión Máxima del Rango de Voltaje	3.512 mV
Rango de Voltaje Mínimo	-10 V , 10 V
Mínima Precisión del Rango de Voltaje	3.512 mV
Razón de Actualización	250 kS/s
Capacidad de Corriente Simple	2 mA
Capacidad de Corriente Total	4 mA
E/S Digital	
Canales Bidireccionales	32
Canales de Entrada Únicamente	0
Canales de Salida Únicamente	0
Número de Canales	0 , 32
Temporización	Software
Niveles Lógicos	TTL
Entrada de Flujo de Corriente	Sinking
Salida de Flujo de Corriente	Sourcing
Filtros de Entrada Programables	No
¿Soporta Estados de Encendido Programables?	Sí
Capacidad de Corriente Simple	16 mA
Capacidad de Corriente Total	50 mA
Temporizador Watchdog	No
¿Soporta Protocolo de Sincronización para E/S?	No
¿Soporta E/S de Patrones?	No
Máximo Rango de Entrada	0 V , 5.25 V
Máximo Rango de Salida	0 V , 3.8 V
Contadores/Temporizadores	
Número de Contadores/Temporizadores	2

Operaciones a Búfer	Si
Eliminación de Rebotes	Si
Sincronización GPS	No
Rango Máximo	0 V , 5.25 V
Frecuencia Máxima de la Fuente	80 MHz
Generación de Pulso	Si
Resolución	32 bits
Estabilidad de Tiempo	50 ppm
Niveles Lógicos	TTL
Especificaciones Físicas	
Longitud	16.9 cm
Ancho	9.4 cm
Altura	3.1 cm
Conector de E/S	Terminales de tornillo
Temporización/Disparo/Sincronización	
Disparo	Digital



Counter/Timer Signal	Default Terminal Number (Name)
CTR 0 SRC	33 (PFI 8)
CTR 0 GATE	34 (PFI 9)
CTR 0 AUX	35 (PFI 10)
CTR 0 OUT	38 (PFI 12)
CTR 0 A	33 (PFI 8)
CTR 0 Z	34 (PFI 9)
CTR 0 B	35 (PFI 10)
CTR 1 SRC	4 (PFI 3)
CTR 1 GATE	6 (PFI 4)
CTR 1 AUX	36 (PFI 11)
CTR 1 OUT	39 (PFI 13)
CTR 1 A	4 (PFI 3)
CTR 1 Z	6 (PFI 4)
CTR 1 B	36 (PFI 11)
FREQ OUT	40 (PFI 14)

Signal Name	Reference	Direction	Description
AI GND	—	—	Analog Input Ground —These terminals are the reference point for single-ended AI measurements in RSE mode and the bias current return point for differential measurements. All three ground references—AI GND, AO GND, and D GND—are connected on the device.
AI <0..31>	Varies	Input	Analog Input Channels 0 to 31 —For single-ended measurements, each signal is an analog input voltage channel. In RSE mode, AI GND is the reference for these signals. In NRSE mode, the reference for each AI <0..31> signal is AI SENSE. For differential measurements, AI 0 and AI 8 are the positive and negative inputs of differential analog input channel 0. Similarly, the following signal pairs also form differential input channels: <AI 1, AI 9>, <AI 2, AI 10>, <AI 3, AI 11>, <AI 4, AI 12>, <AI 5, AI 13>, <AI 6, AI 14>, <AI 7, AI 15>, <AI 16, AI 24>, <AI 17, AI 25>, <AI 18, AI 26>, <AI 19, AI 27>, <AI 20, AI 28>, <AI 21, AI 29>, <AI 22, AI 30>, <AI 23, AI 31>
AI SENSE	—	Input	Analog Input Sense —In NRSE mode, the reference for each AI <0..31> signal is AI SENSE.
Signal Name	Reference	Direction	Description
AO <0..1>	AO GND	Output	Analog Output Channels 0 to 1 —These terminals supply the voltage output of AO channels 0 to 1.
AO GND	—	—	Analog Output Ground —AO GND is the reference for AO <0..1>. All three ground references—AI GND, AO GND, and D GND—are connected on the device.
D GND	—	—	Digital Ground —D GND supplies the reference for PFI <0..15>/P0/P1 and +5 V. All three ground references—AI GND, AO GND, and D GND—are connected on the device.
+5 V	D GND	Input or Output	+5 V Power —These terminals provide a +5 V power source or can be used to externally power the digital outputs.
PFI <0..3>, PFI <8..11>/P0.<0..7>	D GND	Input	(USB-6210/6211/6215/6218 Devices) Programmable Function Interface or Static Digital Input Channels 0 to 7 —Each PFI terminal can be used to supply an external source for AI, AO, or counter/timer inputs. You also can use these terminals as static digital input lines.
PFI <4..7>, PFI <12..15>/P1.<0..7>	D GND	Output	(USB-6210/6211/6215/6218 Devices) Programmable Function Interface or Static Digital Output Channels 0 to 7 —You can route many different internal AI, AO, or counter/timer outputs to each PFI terminal. You also can use these terminals as static digital output lines.
P0.<0..15>*	D GND	Input or Output	(USB-6212/6216 Devices) Port 0 Digital I/O Channels 0 to 15 —You can individually configure each signal as an input or output.

PFI <0..7>/P1.<0..7>, PFI <8..15>/P2.<0..7>	D GND	Input or Output	<p>(USB-6212/6216 Devices) Programmable Function Interface or Digital I/O Channels 0 to 15—Each of these terminals can be individually configured as a PFI terminal or a digital I/O terminal.</p> <p>As a PFI input, each terminal can be used to supply an external source for AI, AO, DI, and DO timing signals or counter/timer inputs.</p> <p>As a PFI output, you can route many different internal AI, AO, DI, or DO timing signals to each PFI terminal. You also can route the counter/timer outputs to each PFI terminal.</p> <p>As a Port 1 or Port 2 digital I/O signal, you can individually configure each signal as an input or output.</p>
USER	—	—	<p>(USB-621x BNC Devices) User-Defined Channel—The USER BNC connector allows you to use a BNC connector for a digital or timing I/O signal of your choice. The USER BNC connector is internally routed to the USER screw terminal. Refer to the appropriate <i>USER</i> section for your USB-621x BNC device in Appendix A, <i>Device-Specific Information</i>, for more information about the USER signal.</p>
NC	—	—	<p>No connect—Do not connect signals to these terminals.</p>
* USB-6212/6216 BNC/Mass Termination devices have eight digital I/O lines, P0.<0..7>.			

ANEXO E. Datasheets



www.fairchildsemi.com

LM2904, LM358/LM358A, LM258/ LM258A

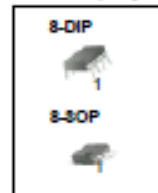
Dual Operational Amplifier

Features

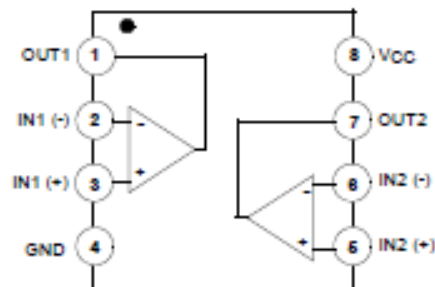
- Internally Frequency Compensated for Unity Gain
- Large DC Voltage Gain: 100dB
- Wide Power Supply Range:
LM258/LM258A, LM358/LM358A: 3V~32V (or $\pm 1.5V \sim 16V$)
LM2904: 3V~26V (or $\pm 1.5V \sim 13V$)
- Input Common Mode Voltage Range Includes Ground
- Large Output Voltage Swing: 0V DC to $V_{CC} - 1.5V$ DC
- Power Drain Suitable for Battery Operation.

Description

The LM2904, LM358/LM358A, LM258/LM258A consist of two independent, high gain, internally frequency compensated operational amplifiers which were designed specifically to operate from a single power supply over a wide range of voltage. Operation from split power supplies is also possible and the low power supply current drain is independent of the magnitude of the power supply voltage. Application areas include transducer amplifier, DC gain blocks and all the conventional OP-AMP circuits which now can be easily implemented in single power supply systems.



Internal Block Diagram



Rev. 1.0.2

©2002 Fairchild Semiconductor Corporation

±5V AC Electrical Characteristics (Continued)Unless otherwise specified, $T_J = 25^\circ\text{C}$, $V^+ = +5\text{V}$, $V^- = -5\text{V}$, $V_{\text{CM}} = 0\text{V}$, and $R_L = 1\text{ k}\Omega$.

Symbol	Parameter	Conditions	Typ (Note 5)	LM7171AI Limit (Note 6)	LM7171BI Limit (Note 6)	Units
	Second Harmonic (Note 12)	$f_{\text{IN}} = 10\text{ kHz}$	-102			dBc
		$f_{\text{IN}} = 5\text{ MHz}$	-70			dBc
	Third Harmonic (Note 12)	$f_{\text{IN}} = 10\text{ kHz}$	-110			dBc
		$f_{\text{IN}} = 5\text{ MHz}$	-51			dBc
e_n	Input-Referred Voltage Noise	$f = 10\text{ kHz}$	14			$\frac{\text{nV}}{\sqrt{\text{Hz}}}$
i_n	Input-Referred Current Noise	$f = 10\text{ kHz}$	1.8			$\frac{\text{pA}}{\sqrt{\text{Hz}}}$

Note 1: Absolute Maximum Ratings indicate limits beyond which damage to the device may occur. Operating Ratings indicate conditions for which the device is intended to be functional, but specific performance is not guaranteed. For guaranteed specifications and the test conditions, see the Electrical Characteristics.

Note 2: Human body model, 1.5 k Ω in series with 100 pF.

Note 3: Applies to both single-supply and split-supply operation. Continuous short circuit operation at elevated ambient temperature can result in exceeding the maximum allowed junction temperature of 150°C.

Note 4: The maximum power dissipation is a function of $T_{\text{J(MAX)}}$, θ_{JA} , and T_A . The maximum allowable power dissipation at any ambient temperature is $P_D = (T_{\text{J(MAX)}} - T_A) / \theta_{\text{JA}}$. All numbers apply for packages soldered directly into a PC board.

Note 5: Typical values represent the most likely parametric norm.

Note 6: All limits are guaranteed by testing or statistical analysis.

Note 7: Large signal voltage gain is the total output swing divided by the input signal required to produce that swing. For $V_S = \pm 15\text{V}$, $V_{\text{OUT}} = \pm 5\text{V}$. For $V_S = \pm 5\text{V}$, $V_{\text{OUT}} = \pm 1\text{V}$.

Note 8: The open loop output current is guaranteed, by the measurement of the open loop output voltage swing, using 100 Ω output load.

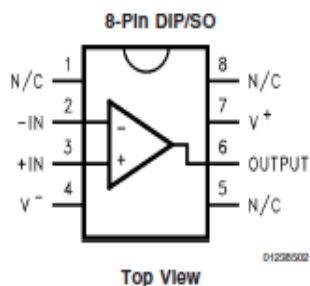
Note 9: Slew Rate is the average of the raising and falling slew rates.

Note 10: Differential gain and phase are measured with $A_V = +2$, $V_{\text{IN}} = 1\text{ V}_{\text{PP}}$ at 3.58 MHz and both input and output 75 Ω terminated.

Note 11: Input differential voltage is applied at $V_S = \pm 15\text{V}$.

Note 12: Harmonics are measured with $V_{\text{IN}} = 1\text{ V}_{\text{PP}}$, $A_V = +2$ and $R_L = 100\Omega$.

Note 13: The THD measurement at low frequency is limited by the test instrument.

Connection Diagram

LM710 Voltage Comparator

General Description

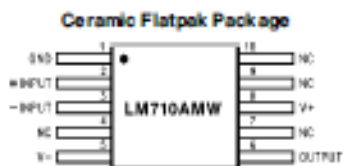
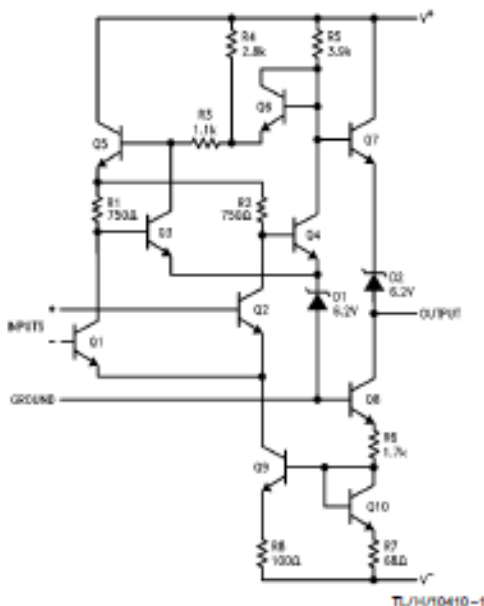
The LM710 series are high-speed voltage comparators intended for use as an accurate, low-level digital level sensor or as a replacement for operational amplifiers in comparator applications where speed is of prime importance. The circuit has a differential input and a single-ended output, with saturated output levels compatible with practically all types of integrated logic.

The device is built on a single silicon chip which insures low offset and thermal drift. The use of a minimum number of stages along with minority-carrier lifetime control (gold doping) makes the circuit much faster than operational amplifiers in saturating comparator applications. In fact, the low

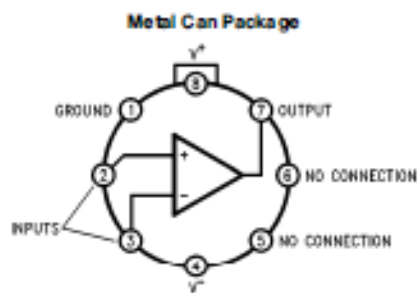
stray and wiring capacitances that can be realized with monolithic construction make the device difficult to duplicate with discrete components operating at equivalent power levels.

The LM710 series are useful as pulse height discriminators, voltage comparators in high-speed A/D converters or go, no-go detectors in automatic test equipment. They also have applications in digital systems as an adjustable-threshold line receiver or an interface between logic types. In addition, the low cost of the units suggests them for applications replacing relatively simple discrete component circuitry.

Schematic and Connection Diagrams



Order Number LM710AMW/883*
See NS Package Number W10A

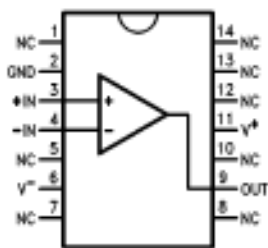


Top View

Note: Pin 4 is connected to case.

Order Number LM710AMH/883*, LM710H,
LM710H/883 or LM710CH
See NS Package Number H08C

Dual-In-Line Package



Top View

Order Number
LM710AMJ/883* or LM710CN
See NS Package Number N14A or J14A

CD4049UBC • CD4050BC Hex Inverting Buffer • Hex Non-Inverting Buffer

General Description

The CD4049UBC and CD4050BC hex buffers are monolithic complementary MOS (CMOS) integrated circuits constructed with N- and P-channel enhancement mode transistors. These devices feature logic level conversion using only one supply voltage (V_{DD}). The input signal high level (V_{IH}) can exceed the V_{DD} supply voltage when these devices are used for logic level conversions. These devices are intended for use as hex buffers, CMOS to DTL/TTL converters, or as CMOS current drivers, and at $V_{DD} = 5.0V$, they can drive directly two DTL/TTL loads over the full operating temperature range.

Features

- Wide supply voltage range: 3.0V to 15V
- Direct drive to 2 TTL loads at 5.0V over full temperature range
- High source and sink current capability
- Special input protection permits input voltages greater than V_{DD}

Applications

- CMOS hex inverter/buffer
- CMOS to DTL/TTL hex converter
- CMOS current "sink" or "source" driver
- CMOS HIGH-to-LOW logic level converter

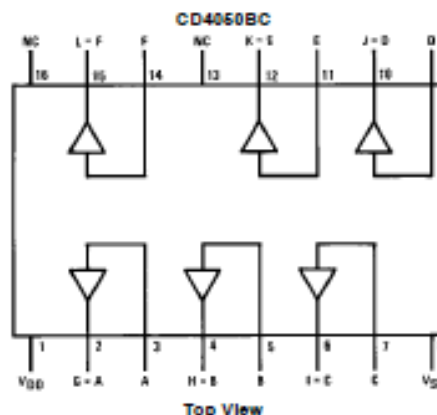
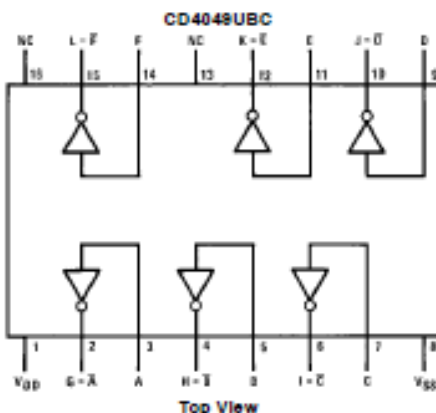
Ordering Code:

Order Number	Package Number	Package Description
CD4049UBCM	M15A	16-Lead Small Outline Integrated Circuit (SOIC), JEDEC MS-012, 0.150" Narrow
CD4049UBCN	N16E	16-Lead Plastic Dual-In-Line Package (PDIP), JEDEC MS-001, 0.300" Wide
CD4050BCM	M15A	16-Lead Small Outline Integrated Circuit (SOIC), JEDEC MS-012, 0.150" Narrow
CD4050BCN	N16E	16-Lead Plastic Dual-In-Line Package (PDIP), JEDEC MS-001, 0.300" Wide

Devices also available in Tape and Reel. Specify by appending the suffix letter "X" to the ordering code.

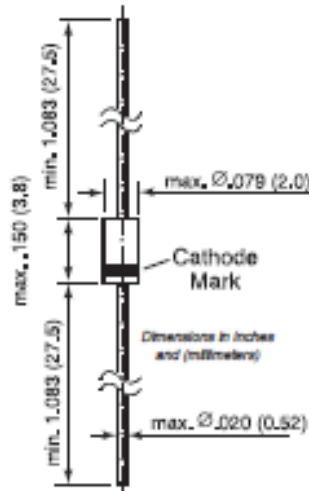
Connection Diagrams

Pin Assignments for DIP





DO-204AH (DO-35 Glass)



Features

- For general purpose applications
- Metal-on-silicon Schottky barrier device which is protected by a PN junction guard ring. The low forward voltage drop and fast switching make it ideal for protection of MOS devices, steering, biasing and coupling diodes for fast switching and low logic level applications.
- This diode is also available in the MINIMELF case with type designation LL5711 and LL6263.

Mechanical Data

Case: DO-35 Glass Case

Weight: approx. 0.13g

Packaging Codes/Options:

D7/10K per 13" reel (52mm tape), 20K/box

D8/10K per Ammo tape (52mm tape), 20K/box

Maximum Ratings & Thermal Characteristics Ratings at 25°C ambient temperature unless otherwise specified.

Parameter	Symbol	Value	Unit
Peak Inverse Voltage	V_{RRM}	70 60	V
Power Dissipation (Infinite Heatsink)	P_{tot}	400 ⁽¹⁾	mW
Maximum Single Cycle Surge 10 μ s Square Wave	I_{FSM}	2.0	A
Thermal Resistance Junction to Ambient Air	$R_{\theta JA}$	0.3 ⁽¹⁾	°C/mW
Junction Temperature	T_J	125 ⁽¹⁾	°C
Storage Temperature Range	T_S	-55 to +150 ⁽¹⁾	°C

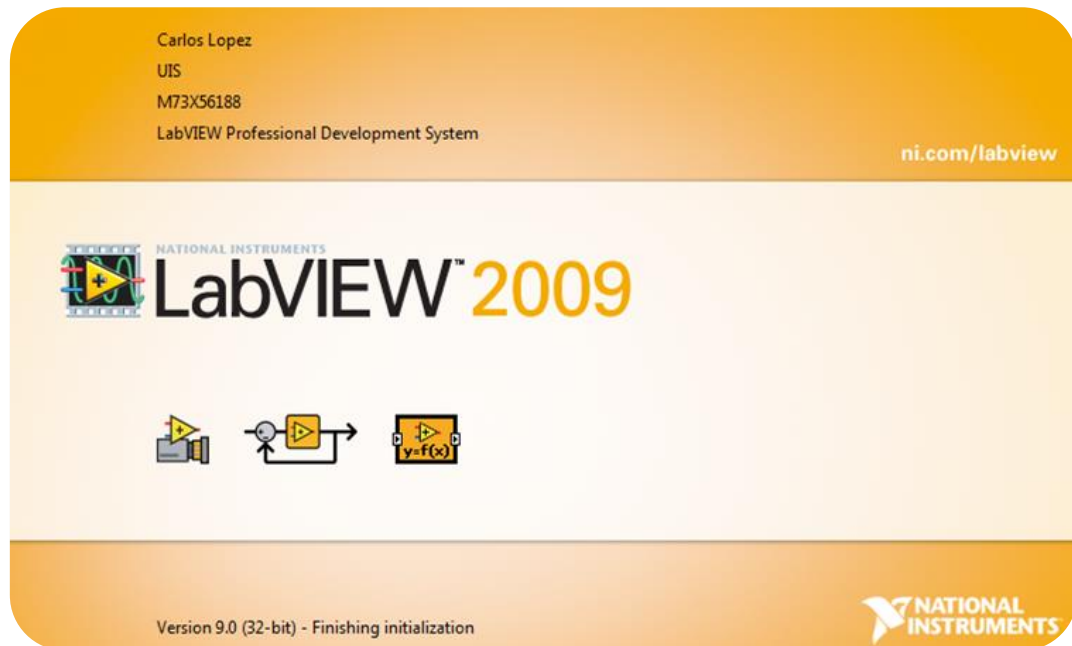
Electrical Characteristics ($T_J = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted)

Parameter	Symbol	Test Condition	Min	Typ	Max	Unit
Reverse Breakdown Voltage	$V_{(BR)R}$	$I_R = 10\mu\text{A}$	70 60	—	—	V
Leakage Current	I_R	$V_R = 50\text{V}$	—	—	200	nA
Forward Voltage Drop	V_F	$I_F = 1\text{mA}$ $I_F = 15\text{mA}$	—	—	0.41 1.0	V
Junction Capacitance	C_{jst}	$V_R = 0\text{V}, f = 1\text{MHz}$	—	—	2.2	pF
Reverse Recovery Time	t_{rr}	$I_F = I_R = 5\text{mA}$, recover to 0.1 I_R	—	—	1	ns

Note: (1) Valid provided that leads at a distance of 4mm from case are kept at ambient temperature.

10/8/00

ANEXO F. LabView



LabVIEW constituye un revolucionario sistema de programación gráfica para aplicaciones que involucren adquisición, control, análisis y presentación de datos. Las ventajas que proporciona el empleo de LabVIEW se resumen en las siguientes:

- Se reduce el tiempo de desarrollo de las aplicaciones al menos de 4 a 10 veces, ya que es muy intuitivo y fácil de aprender.
- Dota de gran flexibilidad al sistema, permitiendo cambios y actualizaciones tanto del hardware como del software.
- Da la posibilidad a los usuarios de crear soluciones completas y complejas.

- Con un único sistema de desarrollo se integran las funciones de adquisición, análisis y presentación de datos.
- El sistema está dotado de un compilador gráfico para lograr la máxima velocidad de ejecución posible.
- Tiene la posibilidad de incorporar aplicaciones escritas en otros lenguajes.

LabVIEW es un entorno de programación destinado al desarrollo de aplicaciones,

Similar a los sistemas de desarrollo comerciales que utilizan el lenguaje C o BASIC. Sin embargo, LabVIEW se diferencia de dichos programas en un importante aspecto: los citados lenguajes de programación se basan en líneas de texto para crear el código fuente del programa, mientras que LabVIEW emplea la programación gráfica o lenguaje G para crear programas basados en diagramas de bloques.

Para el empleo de LabVIEW no se requiere gran experiencia en programación, ya que se emplean iconos, términos e ideas familiares a científicos e ingenieros, y se apoya sobre símbolos gráficos en lugar de lenguaje escrito para construir las aplicaciones. Por ello resulta mucho más intuitivo que el resto de lenguajes de programación convencionales.

LabVIEW posee extensas librerías de funciones y subrutinas. Además de las funciones básicas de todo lenguaje de programación, LabVIEW incluye librerías específicas para la adquisición de datos, control de instrumentación VXI, GPIB y comunicación serie, análisis presentación y guardado de datos.

LabVIEW también proporciona potentes herramientas que facilitan la depuración de los programas.

Los programas desarrollados mediante LabVIEW se denominan Instrumentos Virtuales (VIs), porque su apariencia y funcionamiento imitan los de un instrumento

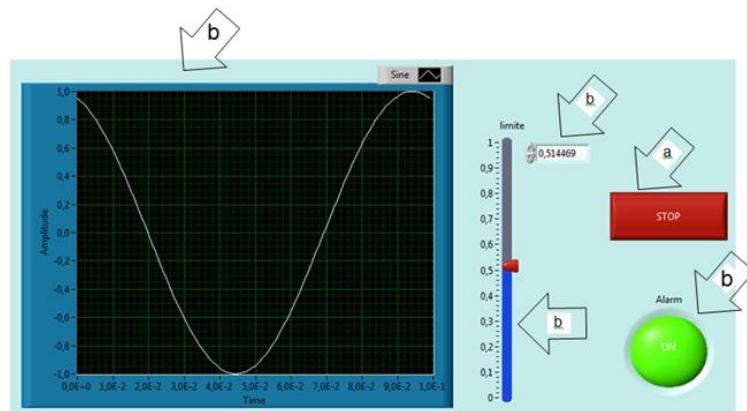
real. Sin embargo son análogos a las funciones creadas con los lenguajes de programación convencionales. Los VIs tienen una parte interactiva con el usuario y otra parte de código fuente, y aceptan parámetros procedentes de otros VIs.

Todos los VIs tienen un panel frontal y un diagrama de bloques. Las paletas contienen las opciones que se emplean para crear y modificar los VIs. A continuación se procederá a realizar una somera descripción de estos conceptos.

Se trata de la interfaz gráfica del VI con el usuario. Esta interfaz recoge las entradas procedentes del usuario y representa las salidas proporcionadas por el programa. Un panel frontal está formado por una serie de botones, pulsadores, potenciómetros, gráficos, etc.

Cada uno de ellos puede estar definido como un control (a) o un indicador (b).

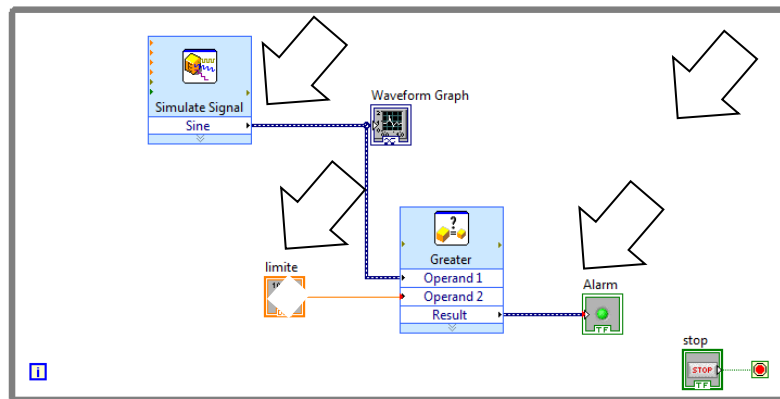
Los primeros sirven para introducir parámetros al VI, mientras que los indicadores se emplean para mostrar los resultados producidos, ya sean datos adquiridos o resultados de alguna operación.



El diagrama de bloques constituye el código fuente del VI. En el diagrama de bloques es donde se realiza la implementación del programa del VI para controlar o realizar cualquier procesado de las entradas y salidas que se crearon en el panel frontal.

El diagrama de bloques incluye funciones y estructuras integradas en las librerías que incorpora LabVIEW. En el lenguaje G las funciones y las estructuras son nodos elementales. Son análogas a los operadores o librerías de funciones de los lenguajes convencionales.

Los controles e indicadores que se colocaron previamente en el Panel Frontal, se materializan en el diagrama de bloques mediante los terminales. A continuación se presenta un ejemplo de lo recién citado:



(a) Función.

(b) Terminales (control e indicador).

(c) Estructura.

El diagrama de bloques se construye conectando los distintos objetos entre sí, como si de un circuito se tratara. Los cables unen terminales de entrada y salida con los objetos correspondientes, y por ellos fluyen los datos.

LabVIEW posee una extensa biblioteca de funciones, entre ellas, aritméticas, comparaciones, conversiones, funciones de entrada/salida, de análisis, etc.

Las estructuras, similares a las declaraciones causales y a los bucles en lenguajes convencionales, ejecutan el código que contienen de forma condicional o repetitiva (bucle, for, while, case,...).

Los cables son las trayectorias que siguen los datos desde su origen hasta su destino, ya sea una función, una estructura, un terminal, etc. Cada cable tiene un color o un estilo diferente, lo que diferencia unos tipos de datos de otros.

Las paletas de LabVIEW proporcionan las herramientas que se requieren para crear y modificar tanto el panel frontal como el diagrama de bloques. Existen las siguientes paletas:

La paleta de herramientas se emplea tanto en el panel frontal como en el diagrama de bloques. Contiene las herramientas necesarias para editar y depurar los objetos tanto del panel frontal como del diagrama de bloques.



Las opciones que presenta esta paleta son las siguientes:



Operatingtool – Cambia el valor de los controles.



Positioningtool – Desplaza, cambia de tamaño y selecciona los objetos.



Labelingtool – Edita texto y crea etiquetas.



Wiringtool – Une los objetos en el diagrama de bloques.



Object Pop-up Menutool – Abre el menú desplegable de un objeto.



Scrolltool – Desplaza la pantalla sin necesidad de emplear las barras dedesplazamiento.



Breakpointtool – Fija puntos de interrupción de la ejecución del programaenVIs, funciones y estructuras.



Probetool – Crea puntos de prueba en los cables, en los que se puede visualizar el valor del dato que fluya por dicho cable en cada instante.



Color Copytool – Copia el color para después establecerlo mediante la siguiente herramienta.



Color tool – Establece el color de fondo y el de los objetos

La paleta de controles de la ventana correspondiente al panel frontal contiene las siguientes opciones:



Numeric – Para la introducción y visualización de cantidades numéricas.



Boolean – Para la entrada y visualización de valores booleanos.



String&Table – Para la entrada y visualización de texto.



List& Ring – Para visualizar y/o seleccionar una lista de opciones.



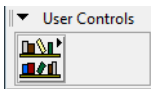
Array&Cluster – Para agrupar elementos.



Graph – Para representar gráficamente los datos.



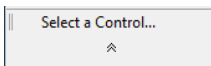
Decorations – Para introducir decoraciones en el panel frontal. No visualizan datos.



UserControls – Para elegir un control creado por el propio usuario.



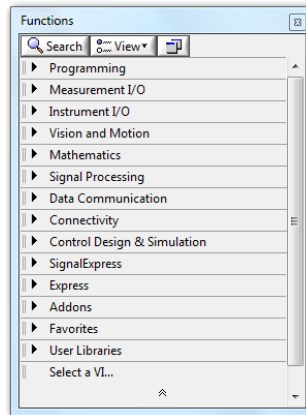
ActiveX – Para transferir datos y programas de unas aplicaciones a otras dentro de Windows.



Select a Control – Para seleccionar cualquier control.

Al seleccionar objetos desde el menú Controls estos aparecen sobre el panel frontal, pueden colocarse donde convenga, y además tienen su propio menú desplegable que permite la configuración de algunos parámetros específicos de cada tipo de control.

La Paleta de funciones se emplea en el diseño del diagrama de bloques. La paleta de funciones contiene todos los objetos que se emplean en la implementación del programa del VI, ya sean funciones aritméticas, de entrada/salida de señales, entrada/salida de datos a fichero, adquisición de señales, temporización de la ejecución del programa, etc.



Para seleccionar una función o estructura concretas, se debe desplegar el menú Functions y elegir entre las opciones que aparecen. A continuación se enumeran todas ellas, junto con una pequeña definición.



Structures – Muestra las estructuras de control del programa, junto con las variables locales y globales.



Numeric – Muestra funciones aritméticas y constantes numéricas.



Boolean – Muestra funciones y constantes lógicas.



String – Muestra funciones para manipular cadenas de caracteres, así como constantes de caracteres.



Array – Contiene funciones útiles para procesar datos en forma de vectores, así como constantes de vectores.



Cluster – Contiene funciones útiles para procesar datos procedentes de gráficas y destinados a ser representados en ellas, así como las correspondientes constantes.



Comparison – Muestra funciones que sirven para comparar números, valores booleanos o cadenas de caracteres.



Time & Dialog – Contiene funciones para trabajar con cuadros de diálogo, introducir contadores y retardos, etc.



File I/O – Muestra funciones para operar con ficheros.



Communication – Muestra diversas funciones que sirven para comunicar varios ordenadores entre sí, o para permitir la comunicación entra distintos programas.



Instrument I/O – Muestra un submenú de VIs, que facilita la comunicación con instrumentos periféricos que siguen la norma ANSI/IEEE 488.2-1987, y el control del puerto serie.



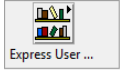
Data Acquisition – Contiene a su vez un submenú donde puede elegirse entre distintas librerías referentes a la adquisición de datos.



Analysis – Contiene un submenú en el que se puede elegir entre una amplia gama de funciones matemáticas de análisis.



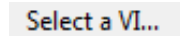
Instrument drivers – En él se muestran los drivers disponibles de distintos instrumentos.



UserLibraries – Muestra as librerías definidas por el usuario. En este caso, la librería mostrada contiene los drivers de la tarjeta de adquisición de datos de Advantech.



Application control – Contiene varias funciones que regulan el funcionamiento de la propia aplicación en ejecución.



Select a VI – Permite seleccionar cualquier VI para emplearlo como subVI.

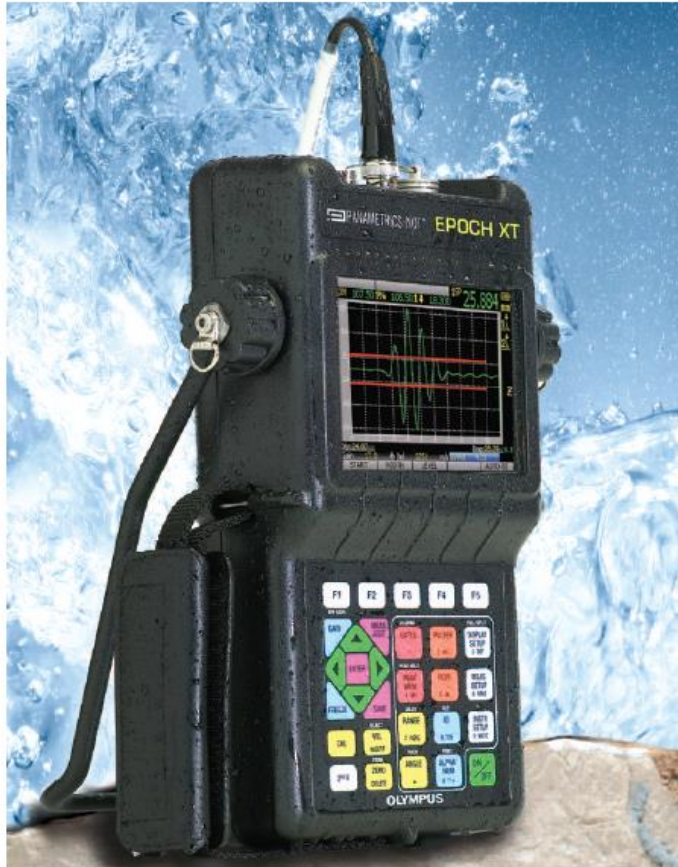
ANEXO G. EPOCH XT

OLYMPUS

Your Vision, Our Future

DETECTOR DE DEFECTOS POR ULTRASONIDOS

EPOCH XT



Completo detector de defectos por ultrasonidos

El detector de defectos por ultrasonidos EPOCH™ XT está diseñado para ofrecer una gran flexibilidad de inspección durante condiciones rigurosas. Asimismo, es compacto, está dotado de herramientas eficaces de detección y medición de defectos, cuenta con una pantalla brillante LCD en colores, funciona con diferentes tipos de baterías y posee una gran capacidad de tratamiento de datos y numerosas herramientas software. Por si fuera poco, su caja sellada responde a las exigencias de la norma IP-67.

La **nueva generación** de detectores de defectos EPOCH



CARACTERÍSTICAS

- Conforme a la norma europea EN12668-1.
- Aprobado para ambientes explosivos, vibraciones y choques.
- Diseñado para cumplir con la exigencias de la norma IP-67. Sellado para resistir ambientes adversos.
- Curvas dinámicas DAC/TVG estándares.
 - Curvas dinámicas DAC.
 - Curvas personalizadas de advertencia.
 - Conformidad a las exigencias de las normas ASME y JIS.
 - Tabla TVG de avanzada que permite ajustes personalizados.
- Uso de varios tipos de baterías: Li-ion, NiMH y tipo C.
- Puerto USB servidor para la impresión directa y el almacenamiento en unidades USB.
- Puerto USB cliente para la comunicación con una computadora.
- Tecnología PerfectSquare™: Control electrónico del impulso en los flancos de bajada y de subida para optimizar el rendimiento del palpador y la resolución cercana a la superficie.
- PRF de 10 Hz a 1 kHz, en incrementos de 10 Hz. Todas las medidas se toman con un «disparo único».
- Potente registrador de datos alfanuméricos: Los archivos del EPOCH XT se pueden ajustar en pantalla.
- Archivos en incrementos simples.
- Pantalla LCD colores.
- Liviano: 2,1 kg.

82 0-1058-ES

Prácticas herramientas de medición integradas

El EPOCH™ XT cuenta con muchas herramientas estándares de medición, como el emisor ajustable de ondas cuadradas, los filtros digitales de banda estrecha y de banda ancha seleccionables, la ganancia de 0 dB a 110 dB, la memoria de picos y el mantenimiento de picos, la frecuencia de repetición de impulsos ajustable, la resolución de medición de 0,01 mm (0,001 pulg.) y las dos puertas con alarmas programables. Asimismo, ofrece muchas herramientas *software* estándares y opcionales: curvas dinámicas DAC/TVG, diagramas DGS/AVG integrados, ajustes conformes a las normas AWS D1.1 y D1.5, corrección de superficies curvas y programa informático CageView™ Pro.

- El emisor de ondas cuadradas es estándar, está dotado de la tecnología PerfectSquare™ y permite el ajuste del ancho del impulso para optimizar el rendimiento del palpador.
- Receptor de filtro digital estándar: banda ancha, diferentes ajustes de banda estrecha y un ajuste de filtro paso alto.
- Visualización en la pantalla de cinco medidas personalizadas para responder a las necesidades de inspección. Es posible seleccionar el tipo de medida de la puerta 1 y de la puerta 2 que aparecerá en cada campo de lectura.
- Resolución de la medición de amplitud de 0,25% de la altura de la pantalla completa.
- Medición de la amplitud de 0% al 110% de la altura de la pantalla completa.
- Modos de medición de la puerta: pico, flanco y de primer pico para la medición del espesor.
- Ajuste de la velocidad de medición entre 10 Hz y 1 Hz, en incrementos de 10 Hz, en la pantalla en tiempo real.
- La memoria de picos y el mantenimiento de picos funcionan en todos los modos rectificadas. El mantenimiento de picos también funciona en modo RF.
- Nuevos modos de visualización de la cuadrícula:
 - estándar de 1 a 10;
 - trayectoria acústica;
 - salto de la onda para inspecciones angulares; y
 - representación vertical de las imágenes al 100% ó 110%.
- Indicador de salto e indicador del modo de medición para cada puerta.
- Indicador de alarma para cada puerta.



TECLADO DE ACCESO DIRECTO

- Organización lógica de las teclas mediante colores.
- Acceso directo a los parámetros de ajuste importantes.
- Entrada inmediata de los caracteres alfanuméricos.
- Cinco teclas de función personalizada permiten la selección rápida de los valores preajustados.
- Disponible en inglés, japonés, chino y símbolos internacionales.



www.olympus-ims.com

Potentes herramientas *software*



Curva DAC de tipo ASME III del EPOCH XT

HERRAMIENTAS SOFTWARE ESTÁNDARES

Curvas dinámicas DAC y TVG

Calcula la amplitud de la señal en porcentaje (%) o en intensidad sonora (dB) según la curva DAC o la amplitud del eco de referencia fijada con la TVG. Las versiones DAC incluyen las de tipo ASME, ASME 3, JIS y curvas personalizadas. Además, permite el ajuste dinámico de las curvas DAC, el paso entre las curvas DAC y TVG, las curvas DAC/TVG al 20% y al 80% de la altura de la pantalla completa, la tabla TVG flexible y las curvas de advertencia DAC personalizadas.

Corrección de la superficie curva (CSC)

Corrige la información de la trayectoria acústica cuando se utilizan palpadores angulares durante la inspección circunferencial de superficies curvas.

HERRAMIENTAS SOFTWARE OPCIONALES

Normas AWS D1.1 y D1.5

Proporciona una indicación dinámica del reflector para diversas aplicaciones de inspección de soldadura según la *American Welding Society* (AWS). Así se logran inspecciones más eficientes, al eliminar los cálculos manuales. (N.º EPXT/AWS)

B-scan

B-scan basado en un único valor (espesor), permite escaneos codificados o manuales para el control de la corrosión. Es posible visualizar simultáneamente la representación del A-scan y del B-scan. Esta herramienta funciona en todos los modos de inspección, incluso en el modo TVG, eco a eco y puerta flotante. Esta herramienta incluye la herramienta de puerta flotante. (N.º EPXT-BSCAN)

Puerta flotante

Permite que la puerta 1 o la puerta 2 «flote» a la altura seleccionada, con respecto al eco en la puerta (-1 dB a -14 dB). El propósito de esta herramienta es obtener lecturas más consistentes y precisas, sobre todo cuando se utiliza el modo de detección en el borde del eco. Esta herramienta opcional está incluida en la opción B-scan. (N.º EPXT-FG)

Filtros avanzados

Aprovecha el diseño único del receptor digital del EPOCH™ XT y permite una flexibilidad de filtrado sin precedente. Selección entre 37 ajustes de filtros diferentes. Esta herramienta aumenta las prestaciones del equipo, como por ejemplo:

- Rendimiento mejorado con palpadores de baja frecuencia comúnmente utili-

zados en inspecciones de compuestos y plásticos.

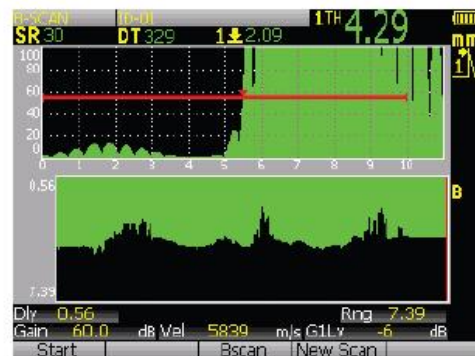
- Recuperación más rápida del impulso inicial con los nuevos ajustes de acoplamiento CC.
- Respuesta optimizada de la banda ancha de los palpadores de media a alta frecuencia.
- Uso de varios palpadores de muy baja frecuencia (50 kHz a 100 kHz) para aplicaciones especializadas. (N.º EPXT-FILTERS)

Diagramas DGS/AVG

Técnica para estimar las dimensiones de los defectos que permite la evaluación de los ecos mediante diagramas DGS/AVG para un palpador y material determinados. El diagrama DGS/AVG muestra la relación entre la altura del eco, el tamaño del defecto y la distancia que los separa del palpador. (N.º EP4P/DGS/AVG)

Carpeta AVG/DGS

Contiene diagramas DGS/AVG y hojas de especificaciones para todos los palpadores Olympus angulares, duales y de suela protegida de la serie Atlas. Esta carpeta de seis anillos protege los diagramas, ya de por sí resistentes al rasgado y a salpicaduras.



Puerta flotante y B-scan del EPOCH XT

Diseño para condiciones rigurosas



PROTECCIÓN AMBIENTAL

El EPOCH XT es un equipo robusto y diseñado para responder a las exigencias del índice de protección IP67; así, puede soportar los rigores de operación en condiciones difíciles, tanto en alta mar como en el desierto.

- Su diseño responde a las exigencias medioambientales de hermeticidad de la norma IP-67.
- Funcionamiento en ambientes explosivos: Norma MIL-STD-810F, Procedimiento 1 y norma NFPA 70E, Sección 500, Clase 1, Div. 2, Grupo D.
- Ensayo de resistencia a los choques: Norma IEC 60068-2-27, 60 g, 6 μ s H.S., 3 ejes, 18 total.
- Ensayo de resistencia a las vibraciones sinusoidales: Norma IEC 60068-2-6, entre 50 Hz y 150 Hz a 0,03 pulgadas DA o 2 g, 20 ciclos de barrido.
- Temperatura de funcionamiento:
 - Baterías de Li-ion: -20 °C a +50 °C.
 - Baterías de NiMH: 0 °C a 50 °C.
 - Baterías alcalinas: -10 °C a +50 °C.
 - Temperatura de recambio: 0 °C a 40 °C.
- Temperatura de almacenamiento de las baterías: 0 °C a 50 °C.

CARACTERÍSTICA

- La correa de mano puede ser fijada al lado derecho o izquierdo del equipo.
- El soporte recubierto de caucho es fácil de usar y puede ser plegado o retirado.
- Anillos en D durables y montados en el equipo para el uso del arnés de pecho.
- Compartimiento hermético de la batería. No es necesario de ninguna



herramienta para reemplazar la batería.

- Compartimiento hermético de las E/S del adaptador de CA y de las conexiones USB.

BATERÍAS

El EPOCH XT acepta tres tipos de baterías que proporcionan una larga duración de funcionamiento.

- Recargables en el equipo:
 - Baterías de Li-ion.
 - Baterías de NiMH.
 - Baterías alcalinas C.
- Cargador externo de batería «inteligente» (opcional).

ESTUCHE PROTECTOR OPCIONAL

El EPOCH™ XT cuenta con un estuche protector de caucho opcional que lo protege en ambientes adversos. El estuche protector de caucho viene en negro o blanco. El de color blanco, junto con el teclado opcional de fondo blanco (véase la figura de la izquierda) está diseñado para reducir al mínimo la absorción del calor en climas de intenso calor y luz solar.



PUERTOS E/S OPCIONALES

- Puerto de E/S de 16 pines (opcional)
 - Salidas de alarma.
 - Entrada y salida del disparador.
 - Interfaz del codificador.
- Cable de E/S de 16 pines disponible
 - N.º de referencia: EPXT-C-16HW-6 (6 pies).
 - N.º de referencia: EPXT-C-16HW-20 (20 pies).

SALIDA VGA

El EPOCH™ XT está dotado de un puerto VGA que permite ver las imágenes en la mayoría de monitores, proyectores y otras pantallas externas. El cable VGA permite la conexión de dispositivos compatibles VGA al EPOCH XT. (N.º EPXT-C-VGA-6)

SALIDA ANALÓGICA OPCIONAL

El EPOCH™ XT cuenta con un puerto opcional de salida analógica. Ésta permite la transferencia continua de la información de la profundidad y amplitud a un equipo externo, como un registrador de gráficos continuos o una computadora dotada de una tarjeta de conversión analógico-digital. La información es transmitida como una tensión, en una escala de 0 V a 1 V o de 0 V a 10 V. La salida analógica del conector LEMO® 00 —ubicado en el lado derecho del equipo— conecta el EPOCH XT y el equipo externo.

PUERTOS USB DUALES

- Puerto USB cliente: Transferencia rápida de datos a una computadora.
- Puerto USB servidor: Conexión directa con impresoras compatibles USB y para hacer copias de seguridad de los datos de inspección importantes en lectores USB.

Las conexiones USB y los adaptadores de entrada de CA se encuentran en un compartimiento hermético el cual se cierra y se abre mediante un tornillo de apriete manual.

Especificaciones del EPOCH XT*

INFORMACIÓN GENERAL

Conforme a la norma europea EN12668-1.

Peso: 2,1 kg, con la batería de Li-Ion.

Dimensiones: 277 mm x 150 mm x 51 mm (empuñadura), 71 mm (pantalla).

Tecclado: Inglés, japonés, chino e internacional.

Idiomas: Español, inglés, francés, alemán, italiano, japonés, chino, ruso, coreano, noruego y sueco.

Conectores del palpador: BNC o LEMO® 1.

Batería: Li-ion, NiMH o alcalinas C.

Duración de la batería:

Li-ion: 9 a 10 horas. NiMH: 5 horas.
Baterías C: 1 a 2 horas.

Alimentación: Red de corriente alterna de 100 a 120 V CA, de 200 a 240 V CA, de 50 a 60 Hz.

PROTECCIÓN AMBIENTAL

IP-67: Cumple las exigencias del estándar internacional del índice de protección.

Funcionamiento en ambientes explosivos:

Norma MIL-STD-810F, Procedimiento 1 y norma NFPA 70E, Sección 500, Clase 1, Div 2, Grupo D.

Ensayo de resistencia a los choques: Norma IEC 60068-2-27, 60 g, 6 µs H.S., 3 ejes, 18 total.

Ensayo de resistencia a las vibraciones sinusoidales: Norma IEC 60068-2-6, entre 50 Hz y 150 Hz a 0,03 pulgadas DA o 2 g, 20 ciclos de barrido.

PANTALLA

Pantalla: LCD colores; actualización de 60 Hz selección de los colores y del contraste; y modo de pantalla dividida y completa.

Dimensiones: 320 x 240 píxeles, 101 x 75 mm.

Corte de la línea de base: Los puntos que pasan por el cero en el A-scan RF aparecen como puntos cero en el modo de onda completa.

Cuadrícula de la amplitud: Amplitud al 100% o al 110% del tamaño de la pantalla completa.

Cuadrícula de la base de tiempos: Estándar de 0 a 10 divisiones. En modo de trayectoria acústica, división de la base de tiempo en 5 secciones equidistantes representadas por líneas en la cuadrícula. En modo de salto, representación de los saltos en la trayectoria acústica como líneas de la cuadrícula.

EMISOR

Tipo de emisor: Ajustable de ondas cuadradas.

PRF: Ajustable o automática de 10 Hz a 1 Hz.

Alimentación: 50 V a 475 V; pasos de 25 V.

Ancho del impulso: 25 ns a 5x000 ns (0,1 MHz) con la tecnología PerfectSquare™.

Amortiguamiento: 50 Ω, 63 Ω, 150 Ω, 400 Ω.

RECEPTOR

Ganancia: 0 dB a 110 dB. Dos ajustes y preajustes personalizados del incremento.

Ancho de banda total: 0,2 MHz a 26,5 MHz (-3 dB).

Ajustes de los filtros digitales:

- 0,2 MHz a 10,0 MHz
2,0 MHz a 21,5 MHz
- 0,2 MHz a 1,2 MHz
5,0 MHz a 15,0 MHz
- 0,5 MHz a 4,0 MHz
8,0 MHz a 26,5 MHz
- 1,5 MHz a 8,5 MHz

Rectificación: Onda completa, onda media positiva, onda media negativa y onda RF.

Linealidad del sistema: Horizontal: ±0,2% de la altura de la pantalla completa. Vertical: ±0,25% de la altura de la pantalla completa. Precisión del amplificador: ±1 dB.

Rechazo: 0% a 80% de la altura de la pantalla completa con alarmas visuales.

CALIBRACIÓN

Calibración automatizada de la distancia para la velocidad de propagación de la onda ultrasónica y el desplazamiento del cero.

Modos de inspección: Pulso-eco, emisión y recepción, y transmisión directa.

Unidades de medida: Milímetros, pulgadas y microsegundos.

Rango: 1,86 mm a 13 400 mm.

Velocidad de propagación de la onda ultrasónica: 635 m/s a 15 240 m/s).

Desplazamiento del cero: 0 µs a 4950 µs.

Retardo de la imagen: -59 mm a 12 700 mm.

Ángulo de refracción: 10° a 85°; paso de 0,1°.

MEDICIONES

Tipos: Espesor, trayectoria acústica, proyección, profundidad, amplitud, tiempo de vuelo para la puerta 1 y puerta 2.

Eco a eco: Estándar.

Campos de lectura: Hasta cinco medidas (seleccionables) en tiempo real provenientes de las puertas.

Curvas DAC/TVG estándares: Hasta 50 puntos de captura, ASME, ASME III, JIS, 80-20%, curva DAC personalizada y tabla TVG. Rango dinámico de 110 dB, ajuste de 100 dB/µs, ajuste completo de la ganancia, del rango y del retardo; cambio entre la curva DAC y TVG.

Curva DAC personalizada: Hasta seis curvas de advertencia de +24 dB a -24 dB.

Ajuste de la tabla TVG: Aplicaciones avanzadas de la curva TVG. Es posible ajustar la tabla TVG con los diagramas DGS/AVG.

Medición de la amplitud: 0% al 110% de la altura de la pantalla completa; resolución de 0,25%.

Corrección de la superficie curva: Mediciones angulares estándares.

Corrección del valor X: Distancia desde el punto de incidencia del haz hasta el frente del palpador.

PUERTAS

Dos puertas independientes para la altura del eco y el tiempo de vuelo.

Inicio de la puerta: Variable dentro del rango.

Ancho de la puerta: Desde el inicio de la puerta hasta el final del rango.

Altura de la puerta: Entre el 2% y el 95% de la altura de la pantalla completa.

Alarmas: Umbrales positivo y negativo, profundidad mínima en la puerta 1 y puerta 2.

Zoom: Igual al valor del ancho de la puerta 1.

ENTRADAS Y SALIDAS

Puerto USB cliente: Comunicación con el programa informático GageView Pro.

Puerto USB servidor: Impresión directa con toda impresora láser o de inyección de tinta compatible PCL5, y almacenamiento de datos en unidades USB.

Puerto de E/S LEMO® (opcional): Salidas de alarma, y entrada y salida del disparador.

Puerto de salida VGA: Conexión de monitores VGA estándares o proyectores.

Salida analógica (opcional): Selección de la tensión de la salida de los datos de profundidad o de amplitud.

ALMACENAMIENTO DE DATOS

Hasta 10 000 códigos de identificación con parámetros de los A-scan, las mediciones y los ajustes.

GARANTÍA

Un año de garantía limitada.

ACCESORIOS ESTÁNDARES

EP-MCA: Adaptador de CA.

EPX-TTC: Estuche de transporte.

EPX-FMAN: Manual del usuario.

EPX-HS: Correa de mano para ser fijada a la izquierda o derecha del equipo.

EPX-PS: Soporte de acero inoxidable recubierto de caucho.

EPX-BAT-L: Batería de Li-ion; o

EPX-BAT-N: Batería de NiMH.

Cubiertas para conectores de palpador.

ACCESORIOS OPCIONALES

EPX-EC: Cargador externo de baterías inteligente.

EP4/CH: Amés de pecho.

EPX-RPC: Estuche protector de caucho (negro).

EPX-RPC-W: Estuche protector de caucho (blanco).

EPX-DP: Protectores traslúcidos de pantalla (10).

EPX-C-16HW-6: Cable de E/S de 16 pines (con diagrama de cableado).

EPX-HWIO-B, L: Opción de E/S.

EPX-EW: Garantía adicional de un año.

EPX-C-VGA-6: Cable VGA.

HERRAMIENTAS SOFTWARE (OPCIÓN)

EPX-DGS-AVG: Diagramas DGS/AVG.

EPX-AWS: Normas AWS D1.1/D1.5.

EPX-BSCAN, EPX-BSCAN-KIT-XX: B-scan.

EPX-FG: Puerta flotante.

EPX-FILTERS: Filtros avanzados.

GAGEVIEWPRO-KIT-USB: GageView Pro.

OLYMPUS NDT INC. cuenta con la certificación ISO 9001

OLYMPUS®

www.olympus-ims.com

info.industria@olympus.es
NDTmexico@olympus.com

OLYMPUS NDT INC.

45 West Avenue, Waltham, MA 02450, EE.UU., Tel: (01) 781-419-0300
OLYMPUS INDUSTRIAL SYSTEMS EUROPA
Stock Road, Southendon-Sea, Essex SSO 5GP, Reino Unido
Tel: (44) 1703 616333

OLYMPUS ESPAÑA, S.A.U.

Vía Augusta 158, Barcelona, 08006, Tel: (34) 902 444 204

OLYMPUS AMÉRICA DE MÉXICO S.A. DE C.V.
Av. Montebello N.º 38, Colonia Nípolitas, Pto 5, Ofidina 1 A 4, C.R. 038 10,
Tel: (52) 96 4000 4255

Epoch_XT_ES_M_201006 • Impreso en Canadá • Derechos de autor © 2010 Olympus NDT.

Todas las especificaciones están sujetas a modificaciones sin previo aviso. Todas las marcas son marcas de comercio o marcas registradas de sus respectivos propietarios o de terceros partes.



ANEXO H. ASTM E213-04



Designation: E 213 – 04

Standard Practice for Ultrasonic Examination of Metal Pipe and Tubing¹

This standard is issued under the fixed designation E 213, the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

1. Scope

1.1 This practice² covers a procedure for detecting discontinuities in metal pipe and tubing during a volumetric examination using ultrasonic methods. Specific techniques of the ultrasonic method to which this practice applies include pulse-reflection techniques, both contact and non-contact (for example, as described in Guide E 1774), and angle beam immersion techniques. Artificial reflectors consisting of longitudinal, and, when specified by the using party or parties, transverse reference notches placed on the surfaces of a reference standard are employed as the primary means of standardizing the ultrasonic system.

1.2 This practice is intended for use with tubular products having outside diameters approximately $\frac{1}{2}$ in. [12.7 mm] and larger, provided that the examination parameters comply with and satisfy the requirements of Section 12. These procedures have been successful with smaller sizes. These may be specified upon contractual agreement between the using parties. These procedures are intended to ensure that proper beam angles and beam shapes are used to provide full volume coverage of pipes and tubes, including those with low ratios of outside diameter-to-wall thickness, and to avoid spurious signal responses when examining small-diameter, thin-wall tubes.

1.3 The procedure in Annex A1 is applicable to pipe and tubing used in nuclear and other special and safety applications. The procedure in Annex A2 may be used to determine the helical scan pitch.

1.4 This practice does not establish acceptance criteria; they must be specified by the using party or parties.

1.5 The values stated in inch-pound units are to be regarded as standard. The SI equivalents are in brackets and may be approximate.

1.6 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appro-*

priate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:³

- E 543 Practice for Evaluating Agencies that Perform Non-destructive Testing
- E 1065 Guide for Evaluating Characteristics of Ultrasonic Search Units
- E 1316 Terminology for Nondestructive Examinations
- E 1774 Guide for Electromagnetic Acoustic Transducers (EMATs)
- E 1816 Practice for Ultrasonic Examinations Using Electromagnetic Acoustic Transducer (EMAT) Techniques

2.2 ASNT Documents:

- Recommended Practice SNT-TC-1A for Nondestructive Testing Personnel Qualification and Certification⁴
- ANSI/ASNT CP-189 Standard for Qualification and Certification of Nondestructive Testing Personnel⁴

2.3 Military Standards:

- MIL-STD-410 Nondestructive Testing Personnel Qualification and Certification⁵

2.4 Aerospace Industries Association Document:

- NAS 410 Certification and Qualification of Nondestructive Testing Personnel⁶

3. Terminology

3.1 *Definitions*—For definitions of terms used in this practice, see Terminology E 1316.

4. Summary of Practice

4.1 A pulsed ultrasonic angle beam by means of non-contact, surface contact or immersion method shall be used. Fig. 1 illustrates the characteristic ultrasonic angle beam entry

¹ This practice is under the jurisdiction of ASTM Committee E07 on Nondestructive Testing and is the direct responsibility of Subcommittee E07.06 on Ultrasonic Method.

Current edition approved January 1, 2004. Published February 2004. Originally approved in 1963. Last previous edition approved in 2002 as E 213 - 02.

² For ASME Boiler and Pressure Vessel Code applications see related Practice SE-213 in the Code.

³ For referenced ASTM standards, visit the ASTM website, www.astm.org, or contact ASTM Customer Service at service@astm.org. For *Annual Book of ASTM Standards* volume information, refer to the standard's Document Summary page on the ASTM website.

⁴ Available from American Society for Nondestructive Testing, Inc., 1711 Arlinggate Lane, Columbus, OH 43228.

⁵ Available from Standardization Documents Order Desk, Bldg. 4 Section D, 700 Robbins Ave., Philadelphia, PA 19111-5094, Attn: NPODS.

⁶ Available from Aerospace Industries Association of America, Inc., 1250 Eye St. NW, Washington D.C. 20005.

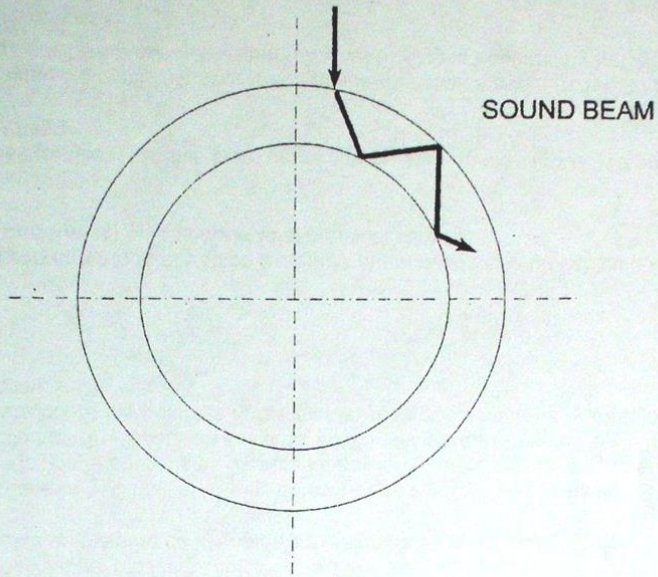


FIG. 1 Circumferential Propagation of Sound in a Pipe or Tube Wall

into the wall of a pipe or tube in the circumferential direction to detect longitudinal discontinuities using a single search unit. Fig. 2 illustrates the characteristic angle beam ultrasound entry into the wall of a pipe or tube in the axial direction to search for transverse discontinuities using a single search unit.

NOTE 1—The immersion method may include tanks, wheel search units, or systems that use streams or columns of liquid to couple the ultrasonic energy from the search unit to the material.

4.2 To ensure detection of discontinuities that may not provide a favorable response from one side, scanning shall be

performed in both circumferential directions for longitudinal discontinuities and when an axial scan is specified by the using party or parties, in both axial directions for transverse discontinuities.

4.3 For efficient examination of large quantities of material, multiple search units and instruments may be used simultaneously to perform scanning in the required directions. Multiple search units may be employed for "interlaced" scanning in each required direction to enable higher examination rates to be achieved through higher allowable scan index or "pitch."

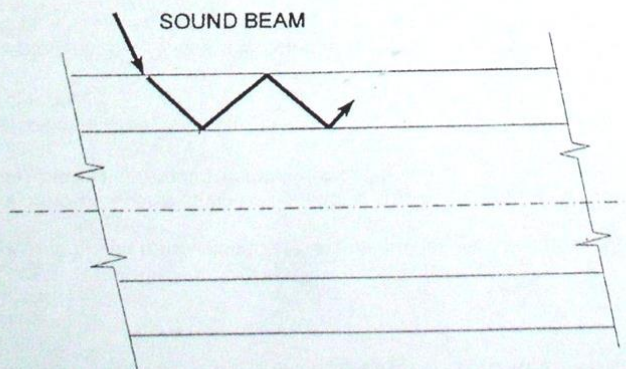


FIG. 2 Axial Propagation of Sound in a Pipe or Tube Wall

5. Significance and Use

5.1 The purpose of this practice is to outline a procedure for detecting and locating significant discontinuities such as pits, voids, inclusions, cracks, splits, etc., by the ultrasonic pulse-reflection method.

6. Basis of Application

6.1 The following are items that must be decided upon by the using party or parties.

6.1.1 Size and type of pipe or tubing to be examined,

6.1.2 Additional scanning for transverse discontinuities,

6.1.3 Items that affect examination coverage may also be specified such as scan overlap, pulse density and maximum search unit size.

6.1.4 The stage(s) in the manufacturing process at which the material will be examined,

6.1.5 Surface condition,

6.1.6 Maximum time interval between equipment standardization checks, if different from that described in 13.2 and the tolerance to be applied to a standardization check,

6.1.7 Type, dimensions, location, method of manufacture, and number of artificial reflectors to be placed on the reference standard,

6.1.8 Method(s) for measuring dimensions of artificial reflectors and tolerance limits if different than specified in Section 11,

6.1.9 Criteria for reportable and rejectable indications (acceptance criteria),

6.1.10 Reexamination of repaired/reworked items, if required or permitted, shall be specified in the contractual agreement.

6.1.11 Requirements for permanent records of the response from each tube, if applicable,

6.1.12 Contents of examination report,

6.1.13 Operator qualifications and certification, if required,

6.1.14 Qualification of Nondestructive Agencies. If specified in the contractual agreement, NDT agencies shall be qualified and evaluated as described in Practice E 543. The applicable edition of Practice E 543 shall be specified in the contractual agreement.

6.1.15 Level of personnel qualification. (See 7.1)

7. Personnel Qualification

7.1 If specified in the contractual agreement, personnel performing examinations to this standard shall be qualified in accordance with a nationally recognized NDT personnel qualification practice or standard such as ANSI/ASNT-CP-189, SNT-TC-1A, MIL STD-410, NAS-410, or a similar document and certified by the employer or certifying agency, as applicable. The practice or standard used and its applicable revision shall be identified in the contractual agreement between the using parties.

NOTE 2—MIL STD-410 is canceled and has been replaced with NAS-410, however, it may be used with agreement between contracting parties.

8. Surface Condition

8.1 All surfaces shall be clean and free of scale, dirt, grease, paint, or other foreign material that could interfere with

interpretation of examination results. The methods used for cleaning and preparing the surfaces for ultrasonic examination shall not be detrimental to the base metal or the surface finish. Excessive surface roughness or scratches can produce signals that interfere with the examination.

9. Apparatus

9.1 Instruments shall be of the pulse echo type and shall be capable of detecting the reference notches of the types described in Section 11 to the extent required in the standardization procedure described in Section 12. An independent channel (or channels) of instrumentation shall be employed to individually monitor the responses from the longitudinal and, when required, transverse oriented search units. The instrument pulse repetition rate shall be capable of being adjusted to a sufficiently high value to ensure notch detection at the scanning rate employed. The instrument shall be capable of this pulse repetition rate without false indications due to spurious reflections or interference from other instruments and search units being used for simultaneous examinations in other directions or along other scan paths.

9.1.1 The frequency and bandwidth of the instrument and search unit shall be capable of being selected to produce a satisfactory signal-to-noise ratio for the detection of the required notches as compared to background "noise" response from irregularities such as grain boundaries and surface roughness.

9.2 Search unit frequency shall be selected to produce a desirable "signal-to-noise" ratio (S/N), from the material to be examined, at the specified sensitivity. A S/N value of at least 3 to 1 is usually considered to be minimum. A higher minimum value is desirable and may be specified by the contracting agency.

9.2.1 Select a search unit size, frequency and refracted angle (or corresponding parameters for non-contact techniques) to produce an approximate 45 degrees beam-center shear wave in the tube or pipe wall. For material with an outside diameter-to-thickness ratio less than 7, a lower refracted angle (or corresponding parameters for non-contact techniques) must be used to ensure intersection with the inside surface. This does not ensure detection of midwall discontinuities [See Reference 5].

9.3 The positions of all conveyor and drive mechanisms must be set to support and feed the material to be examined in a stable manner and at the desired scan "pitch" (helix). For small tubes, support mechanisms must be used in the examination station to prevent any transverse motion with respect to the search unit beam during scanning. If larger material that is not straight is to be examined the search units may have to be supported in a "follower" mechanism to compensate for this.

10. Couplant

10.1 For piezoelectric-based search units (non-contact techniques do not require couplant), a couplant such as water, oil, or glycerin, capable of conducting ultrasonic vibrations between the search unit and the pipe or tube being examined shall be used. Rust inhibitors, softeners, and wetting agents may be added to the couplant. The couplant liquid with all the additives should not be detrimental to the surface condition

of the pipe or tube, and shall wet the surface of the material to provide adequate coupling efficiency. To prevent spurious signals or loss of sensitivity, or both, care must be taken to avoid the presence of air bubbles in the couplant.

NOTE 3—In the contact method, some couplants result in better ultrasonic transmission when the tubing is precoated several hours before the examination.

11. Reference Standards

11.1 A reference standard of a convenient length shall be prepared from a length of pipe or tube of the same nominal diameter, wall thickness, material, surface finish, and acoustical properties as the material to be examined. The reference pipe or tube shall be free of discontinuities or other conditions producing indications that can interfere with detection of the reference notches.

11.2 Longitudinal and, when required by the contracting agency, transverse reference notches shall be placed on both the outside and inside surfaces of the reference standard to ensure satisfactory examination sensitivity near each of these boundaries.

11.3 Reference notches shall be separated sufficiently (circumferentially or axially, or both) to preclude interference and interpretation difficulties.

11.4 All upset metal, burrs, etc., adjacent to the reference notches shall be removed.

11.5 The notch dimensions, which are length, depth, and width (and for V-notches, the included angle) must be decided upon by the using party or parties. Fig. 3 illustrates the common notch configurations and the dimensions to be measured (Note 4). Reflection amplitudes from V-, square-, and U-shaped notches of comparable dimensions may vary widely depending on the angle, frequency, and vibrational mode of the interrogating sound beam.

NOTE 4—In Fig. 3 (a), (b), and (d), the sharp corners are for ease of illustration. It is recognized that in normal machining practice, a radius will be generated.

11.5.1 The notch depth shall be an average measured from the circular tubing surface to the maximum and minimum penetration of the notch. Measurements may be made by optical, replicating, or other agreed upon techniques. Unless specified otherwise by the using party or parties, the notch depth shall be within ± 0.0005 in. [0.013 mm] of the specified value for notches 0.005 in. [0.13 mm] or less in depth, and within +10, -15% of the specified value for notches over 0.005 in. in depth. At the option of the testing agency, shallower notches may be used to provide a more stringent examination.

NOTE 5—For as-rolled or scaly pipe or tube surfaces, it may be necessary to modify 11.5.1. Two acceptable modifications are listed below. Modification (a) is preferred; however, modification (b) may be used unless otherwise specified.

- (a) The circular pipe or tube surface may be smoothed or prepared in the notch area, or
- (b) The notch depth shall be within ± 0.001 in. [0.025 mm], or +10, -15% of the specified depth, whichever is greater.

11.5.2 When notch tolerances are specified by the using party or parties, tolerances may often include only negative values with zero positive deviation allowed so that sensitivity is never reduced below a specified minimum value. The use of smaller notches by the examination agency is permissible, provided that concurrence is obtained from the contracting agency.

NOTE 6—The amplitude of indications obtained from reference notches may not be linearly proportional to notch depth. This depends upon the intercepting beam width to notch length.

11.5.3 The width of the notches shall be as small as practical, but should not exceed twice the depth.

11.6 Other types and orientations of reference reflectors may be specified by the using party or parties.

12. Standardization of Apparatus

12.1 *Static Standardization*—Using the reference standard specified in Section 11, adjust the equipment to produce clearly

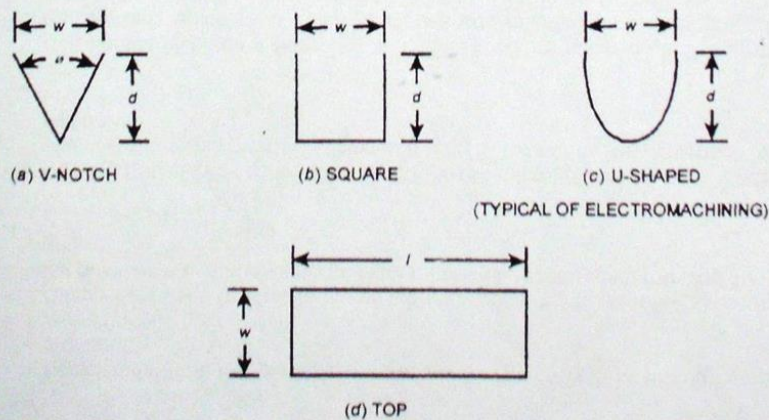


FIG. 3 Common Notch Shapes

identifiable indications from both the inner and outer surface notches. The response from the inner and outer surface notches should be as nearly equal as possible. Use the lesser of the two responses to establish the rejection level. On large diameter or heavy wall pipe and tubing, if the inner and outer surface notch amplitude cannot be made equal because of material soundpath distance and inside diameter curvature, a separate rejection level may be established for the inner and outer surface notches.

NOTE 7—Distance-Amplitude Correction—A method of compensating for the reduction in ultrasonic signal amplitude as a function of material sound-path distance may be employed. Details of the procedures used to establish and apply the distance-amplitude correction (DAC) curve shall be established by the using party or parties.

12.2 Dynamic Standardization—Standardize the equipment under dynamic conditions that simulate the production examination. The pipe or tubing to be examined and the search unit assembly shall have a rotating translating motion relative to each other such that a helical scan path will be described on the outer surface of the pipe or tube. Maintain the speed of rotation and translation constant within $\pm 10\%$. Axial scanning with circumferential indexing may be used to provide equivalent coverage.

12.3 The pitch of the feed helix shall be small enough to ensure at least 100% coverage at the examination distance and sensitivity established during standardization. Coverage shall be based upon the maximum effective size of the search unit, the pulse density for each instrument channel and the helix.

13. Procedure

13.1 Examine the pipe or tubing with the ultrasound transmitted in both circumferential directions for longitudinal discontinuities and, when specified, in both axial directions for transverse discontinuities, under identical conditions used for equipment standardization (see Note 8).

NOTE 8—Identical conditions include all instrument settings, mechanical motions, search unit position and alignment relative to the pipe or tube, liquid couplant, and any other factors that affect the performance of the examination.

NOTE 9—If a requirement exists for both longitudinal and transverse notches the following three options are available:

- (a) Each pipe or tube is passed through a single-channel examination station four times, twice in each direction,
- (b) Each pipe or tube is passed through a two-channel examination station twice, once in each direction, or
- (c) Each pipe or tube is passed through a four-channel examination station once.

13.2 Standardization Checks—Periodically check the dynamic standardization of the equipment by passing the reference standard through the examination system in accordance with 12.2. Make these checks prior to any examination run, prior to equipment shutdown after an examination run, and at least every four hours during continuous equipment operation. Restandardize the equipment in accordance with 12.1 and 12.2 any time the equipment fails to produce the signal amplitudes or other conditions for rejection within the tolerances agreed upon with the contracting agency. In the event that the equipment does not meet this requirement, reexamine all pipe

or tubing examined since the last acceptable standardization after restandardization has been accomplished.

13.2.1 When required by the purchaser, more specific restandardization criteria may be specified.

13.3 For many tubular sizes and examination arrangements, there will be a reflection from the entry surface of the pipe or tube. This signal may be observed, but not gated, as a supplement to the required checking of the reference standard to provide increased assurance that the equipment is functioning properly. If such a signal does not exist, make more frequent equipment standardization checks.

13.4 Do not make any equipment adjustments, during examination, unless the complete standardization procedure described in Section 12 is performed after any such adjustment.

13.5 The examination shall be applied to 100% of the pipe or tubing unless otherwise specified.

NOTE 10—Some traversing mechanisms do not allow examination of pipe or tube ends. When this condition exists, clearly indicate the extent of this effect, per tube, in the examination report.

14. Interpretation of Results

14.1 All indications that are equal to or greater than the rejection level established during standardization as described in Section 12, using the agreed upon reference indicators described in 11.5, shall be considered as representing defects and may be cause for rejection of the pipe or tube. Alternatively, the using party or parties may specify specific acceptance criteria.

14.2 If, upon further examination of the pipe or tube, no rejectable indications are detected, the material shall be considered as having passed the ultrasonic examination, except as noted in 13.2.

NOTE 11—Rejected pipe or tubes may be reworked in a manner acceptable to the purchaser. If, upon ultrasonic reexamination of the reworked pipe or tube, no rejectable indications are detected, the material should be considered as having passed the ultrasonic examination.

NOTE 12—Care should be exercised to ensure that reworking a pipe or tube does not change its acceptability with respect to other requirements of the material specification such as wall thickness, ovality, surface finish, length, and the like.

15. Documentation

15.1 When a report is required, it shall contain such information as is mutually considered adequate to document that the examination of the pipe or tubes supplied meets the requirements of this practice, and any modifications specified in the contractual agreement.

15.2 When a "third party" examination is required, as might be performed by an independent examination facility, and to the extent specified in the contractual agreement, a permanent record containing objective evidence of the examination results shall be obtained for pipe or tube examined. This may be in the form of a strip chart recording or computerized data of the ultrasonic instrument output during the examination. It shall contain recordings of all standardizations and standardization checks and should be annotated to provide a positive correlation between examination record for each reject pipe or tube and the corresponding pipe or tube. The supplier shall maintain a report of the examination on file. When requested by the

customer, a report of the examination shall be submitted to the customer. The report shall include at least the following information:

15.2.1 Identification of the material by type, size, lot, heat treatment, and any other pertinent information.

15.2.2 Identification of the examination equipment and accessories.

15.2.3 Details of the examination technique, including examination speed, examination frequency, and end effects if any.

15.2.4 Description of the reference standard, including the actual (measured) dimensions of the artificial reference reflectors.

15.2.5 Description of the distance-amplitude correction procedure, if used.

15.2.6 Examination results.

16. Keywords

16.1 angle beam; nondestructive examination; pipe; tubing; ultrasonic examination

ANEXO I. ASTM E1901-97



Designation: E 1901 – 97 (Reapproved 2003)

Standard Guide for Detection and Evaluation of Discontinuities by Contact Pulse-Echo Straight-Beam Ultrasonic Methods¹

This standard is issued under the fixed designation E 1901; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

1. Scope

1.1 This guide covers procedures for the contact ultrasonic examination of bulk materials or parts by transmitting pulsed ultrasonic waves into the material and observing the indications of reflected waves. This guide covers only examinations in which one search unit is used as both transmitter and receiver (pulse-echo). This guide includes general requirements and procedures that may be used for detecting discontinuities, locating depth and distance from a point of reference and for making a relative or approximate evaluation of the size of discontinuities as compared to a reference standard.

1.2 This guide complements Practice E 114 by providing more detailed procedures for the selection and calibration of the inspection system and for evaluation of the indications obtained.

1.3 The values stated in inch-pound units are to be regarded as the standard. The SI units given in brackets are for information only.

1.4 *This guide does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this guide to establish the appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:

- E 114 Practice for Ultrasonic Pulse-Echo Straight-Beam Examination by the Contact Method²
- E 127 Practice for Fabricating and Checking Aluminum Alloy Ultrasonic Standard Reference Blocks²
- E 317 Practice for Evaluating Performance Characteristics of Ultrasonic Pulse-Echo Examination Instruments and Systems without the Use of Electronic Measurement Instruments²
- E 428 Practice for Fabrication and Control of Steel Reference Blocks Used in Ultrasonic Inspection²

¹ This guide is under the jurisdiction of ASTM Committee E07 on Nondestructive Testing and is the direct responsibility of Subcommittee E07.06 on Ultrasonic Method.

Current edition approved July 10, 2003. Published September 2003. Originally approved in 1997. Last previous edition approved in 1997 as E 1901 - 97.

² Annual Book of ASTM Standards, Vol 03.03.

E 543 Practice for Agencies Performing Nondestructive Testing²

E 1158 Guide for Material Selection and Fabrication of Reference Blocks for the Pulsed Longitudinal Wave Ultrasonic Examinations of Metal and Metal Alloy Production Materials²

E 1316 Terminology for Nondestructive Examinations²

2.2 ASNT Standard:

SNT-TC-1A Recommended Practice for Personnel Qualification and Certification in Nondestructive Testing Personnel³

2.3 ANSI/ASNT Standard:

CP-189 ASNT Standard for Qualification and Certification of Nondestructive Testing Personnel³

2.4 Military Standard:

MIL-STD-410 Nondestructive Testing Personnel Qualification and Certification⁴

3. Terminology

3.1 *Definitions*—For definitions of terms used in this guide, see Terminology E 1316.

4. Basis for Application

4.1 *Contractual Agreement*—The using parties shall agree on the applicable procedural requirements, as listed herein, prior to the examination of any material.

- 4.1.1 Materials, sizes, and shapes examined,
- 4.1.2 Stage of manufacture when examined (time of test),
- 4.1.3 Surface finish requirements,
- 4.1.4 Minimum equipment requirements, as in Table 1 herein,
- 4.1.5 Search unit size, frequency and type,
- 4.1.6 Couplant,
- 4.1.7 Automated turning, fixturing or scanning, or both, as applicable,
- 4.1.8 Type of reference block standards including surface curvature,
- 4.1.9 Standardization details, including attenuation compensation and DAC techniques,

³ Available from American National Standards Institute (ANSI), 25 W. 43rd St., 4th Floor, New York, NY 10036.

⁴ Available from Standardization Documents Order Desk, Bldg. 4 Section D, 700 Robbins Ave., Philadelphia, PA 19111-5094, Attn: NPODS.

TABLE 1 Minimum Equipment Requirements (Longitudinal Wave)

Instrument Characteristics	Ultrasonic Test Frequency MHZ (Record)
Vertical limit, in. [mm] or percent of full screen height	
Upper vertical linearity limit in. [mm] or percent of full screen height	
Lower vertical linearity limit in. [mm] or percent of full screen height	
Ultrasonic sensitivity, hole size	
64ths distance, in. [mm]	
Entry surface resolution, in. [mm]	
Back surface resolution in. [mm]	
Horizontal limit, in. [mm] or percent of full screen width	
Horizontal linearity range, in. [mm] or percent of full screen width	

- 4.1.10 The surfaces to be examined and the scanning path.
- 4.1.11 Acceptance standards,
- 4.1.12 Personnel certification level, and
- 4.1.13 Instrument characteristics.

4.2 *Written Procedure*—Ultrasonic examinations performed in accordance with this guide shall be detailed in a written procedure. Documentation of procedure qualification shall be maintained by the preparer. Procedures shall be sufficiently detailed so that other qualified examiners may duplicate the examination and obtain equivalent results.

4.3 *Personnel Qualifications*—Personnel performing ultrasonic examinations in accordance with this guide shall be qualified in accordance with a nationally recognized NDT personnel qualification practice or standard; such as SNT-TC-1A, ANSI/ASNT CP-189, MIL-STD-410, or a similar document. The practice or standard used and its applicable revision shall be specified in the contractual agreement between the using parties.

4.4 If specified in the contractual agreement, NDT agencies shall be qualified and evaluated as described in Practice E 543.

5. Summary of Guide

5.1 This guide describes a means for obtaining an evaluation of discontinuities in materials by contact examination using longitudinal waves. Equipment, reference standards, examination and evaluation procedures, and documentation of results are described in detail.

6. Significance and Use

6.1 This guide provides procedures for the application of contact straight-beam examination for the detection and quantitative evaluation of discontinuities in materials.

6.2 Although not all requirements of this guide can be applied universally to all inspections, situations, and materials, it does provide basis for establishing contractual criteria between the users, and may be used as a general guide for preparing detailed specifications for a particular application.

6.3 This guide is directed towards the evaluation of discontinuities detectable with the beam normal to the entry surface. If discontinuities or other orientations are of concern, alternate scanning techniques are required.

7. Apparatus

7.1 Apparatus shall include the following:

7.1.1 *Electronic Equipment*—The electronic equipment shall be capable of producing and processing electronic signals at frequencies in the range of the search unit frequencies being used. The equipment and its display shall provide characteristics as listed in Table 1, that are suitable for the specific application at the specified frequency, as determined in accordance with the procedures and tolerances described in Practice E 317. The equipment, including the search unit, shall be capable of producing echo amplitudes of at least 60 % of full screen height from the reference reflector required for the examination, with the material noise level, from front to back surface not exceeding 20 % of full screen height. Alternatively, if these conditions can be met at one half the part thickness, the part may be inspected from both sides.

NOTE 1—The using parties should agree on the minimum instrument characteristics prior to conducting an examination.

7.1.2 *Voltage Regulator*—If fluctuations in line voltage cause indication amplitude variations exceeding $\pm 1/2$ dB, a voltage regulator shall be required on the power source. This requirement is not applicable to battery-operated units.

7.1.3 *Search Units*—The search unit selected shall be capable of transmitting and receiving ultrasound at the required frequencies and energy levels necessary for discontinuity detection in the material being examined. The search units shall be of the contact type. Only longitudinal wave, straight beam, non-focused search units should be used. Dual element search units may provide better near-surface resolution and detection of small discontinuities. Generally, round or rectangular search units are used for examination whereas round search units with symmetrical sound beam patterns are used for evaluation. Typical search unit sizes range from $1/8$ in. [3.2 mm] in diameter to $1-1/8$ in. [28.6 mm] in diameter with other sizes and shapes available for special applications. Search units may be fitted with contoured shoes to enhance coupling with curved surfaces.

7.1.4 *Alarm(s)*—For the examination of parts with regular shape and parallel surfaces such as machined cylinders, rounds, bars, forgings, etc. an audible/visual alarm may be used in conjunction with visual monitoring of the display for the detection of discontinuities or for the monitoring and detection of loss of back surface reflection, or both. The alarm should be adjustable to allow triggering at commonly required indication amplitudes, back-echo heights, and depths. During examination the audible visual alarm shall be easily detectable by the operator.

7.1.4.1 When reduction in the amplitude of back-surface reflection is monitored simultaneously with the detection of lower amplitude signals from small, discrete discontinuities, two separate gate/alarm systems are required. The negative slaved alarm system may also provide for a significantly lower receiver gain at the gated depth to avoid back-echo saturation. See 10.1 and 10.4.

7.1.4.2 For some applications it may be advantageous to utilize a flaw gate system in which the echo-amplitude alarm level can be varied as a function of target depth. Refer to distance/amplitude gate (DAG) in 9.3.2.1.

7.2 *Couplant*—A couplant, usually a liquid or semi-liquid, is required between the face of the search unit and the examination surface to permit transmittance of ultrasound from the search unit into the material under examination. Typical couplants include water, cellulose gel, oil and grease. Corrosion inhibitors or wetting agents or both may be used. Couplants selected must not be detrimental to the product or the process. The same couplant used for standardization shall be used for the examination. During the performance of a contact ultrasonic examination, the couplant layer between search unit and examination material must be maintained such that the contact area is held constant while maintaining adequate couplant thickness. Lack of couplant that will reduce the effective contact area, or excess couplant, will reduce the amount of energy transferred between the search unit and the examination surface. These couplant variations, in turn, result in examination sensitivity variations.

7.2.1 The couplant should be selected such that its viscosity is appropriate for the surface finish of the material to be examined. The examination of rough surfaces generally requires a high-viscosity couplant and will result in some deterioration of near-surface discontinuity detection. The temperature of the material surface can change the couplant's viscosity as in the case of oil and grease. See Table 2 for the suggested viscosity of oil couplants for given surface roughnesses.

7.2.2 At elevated temperatures as conditions warrant, heat-resistant coupling materials such as silicone oils, gels, or greases should be used. Further, intermittent contact of the search unit with the part surface or auxiliary cooling of the search unit may be necessary to avoid temperature changes that affect the ultrasonic characteristics of the search unit. At higher temperatures, certain couplants based on inorganic salts or thermoplastic organic materials, high-temperature delay materials (shoes) and search units that are not affected by high temperatures may be required.

7.2.3 Where constant coupling over large areas is required, as in automated examination, or where severe changes in surface roughness are found, other methods of coupling such as liquid gap coupling will usually provide a better examination. In this case, the search unit does not contact the examination surface, but is separated by a distance of about 0.02 in. [0.5 mm] filled with couplant. Liquid flowing through the search unit mechanism fills the gap. The flowing liquid provides the coupling path and has the additional advantage of cooling the search unit if the examination surface is warm.

7.2.4 Another means of direct contact coupling is provided by the wheel search unit. The search unit is mounted at the

correct angle to a stationary axle about which rotates a liquid-filled flexible tire. A minimum amount of couplant provides for ultrasonic transmission into the examination surface since the elastic tire material is in rolling contact and conforms closely to the surface.

7.3 *Reference Standards*—The production item itself may be an adequate standard using the height of the back-wall echo for reference. For more quantitative information, charts such as (AVG-DGS) representing distance-amplitude relationships of known reflector sizes for a particular search unit, frequency and material may be used for standardization and evaluation of discontinuities.

7.3.1 *Reference Blocks*—Ultrasonic reference blocks, often called test blocks, are used to standardize the ultrasonic equipment and to evaluate the indications received from discontinuities within the part. The ultrasonic characteristics of the reference blocks such as attenuation, noise level, surface condition, and sound velocity, should be similar to the material to be examined. Standardization verifies that the instrument search unit is performing as required and establishes a detection level for discontinuities.

7.3.2 *Flat Blocks*—The three most commonly used sets of reference block are area-amplitude set, containing blocks with the same material path and various sizes of reference reflectors; distance-amplitude set, containing blocks with one size reference reflector at various material distances; and a combination including both area-amplitude and distance-amplitude blocks in one set. These sets are described in Practices E 127 and E 428.

7.3.3 *Curved Surfaces*—Reference blocks with flat surfaces may be used for establishing gain settings for examinations on concave test surfaces and convex surfaces with radii of curvature 4 in. [101.6 mm] or greater. For convex surfaces with radii of curvature less than 4 in. [101.6 mm] it is recommended that reference blocks with approximately the same nominal radius of curvature shall be used. Guide E 1158 illustrates typical curved entry surface blocks.

7.4 *Reference Reflectors*—Flat-bottomed holes, (FBH), or other artificial discontinuities, located directly in the material, in a representative sample of the part or material, or in reference blocks, should be used to reference echo amplitude or to perform distance-amplitude correction (DAC), or both. For most examinations, the bottom surface of a suitable flat-bottom hole is the common reference reflector. However, other types of artificial discontinuities (notches, side-drilled holes, areas of unbond or lack of fusion, etc.) may be used.

8. General Examination Requirements

8.1 *Material Condition*—Unless otherwise agreed upon, the surface finish of the article under examination shall not exceed 250 μin . [6.4 μm] rms and shall be free from waviness that may affect the examination. Ultrasonic examination should be performed in the simplest configuration possible and after all operations that may cause a discontinuity. Examinations of parts or material prior to machining is acceptable provided surface roughness and part geometry are within the tolerance specified in the written procedure. When it is determined that surface roughness or waviness, or both, precludes adequate detection and evaluation of subsurface discontinuities, smooth

TABLE 2 Suggested Viscosities—Oil Couplants

NOTE 1—This table is a guide and is not meant to exclude the use of a particular couplant that is found to work satisfactorily on a surface.

Approximate Surface Roughness Average (Ra) μin [μm]	Equivalent Couplant Viscosity Weight Motor Oil
5-100 (0.1 to 2.5)	SAE 10
90-200 (1.3 to 5.1)	SAE 20
100-400 (2.5 to 10.2)	SAE 30
250-700 (6.4 to 17.8)	SAE 40
Over 700 (18+)	Cup Grease

the areas in question by machining, grinding, or other means prior to the examination. During examination and evaluation ensure that entry surface free from loose scale, grinding particles, or other loose matter.

8.2 *Coverage*—In all examinations, perform scanning to locate discontinuities that are oriented parallel with the entry surface, or plane, or both, approximately normal to the major propagation direction that is parallel to the grain flow of the part.

8.3 *Resolution and Penetration*—When the complete calibration and examination cannot be accomplished due to excessive noise levels (based on 3:1 signal-to-noise ratio) or material thicknesses, the examinations shall be performed from opposite sides. Examinations conducted from opposite sides shall provide for examination of a minimum of one-half material thickness and shall provide for the resolution and penetration necessary to detect the minimum size reflector at the minimum and maximum metal path distance.

8.4 *Ultrasonic Frequency*—In general, the higher frequencies provide a more directive sound beam and provide better resolution throughout the material cross section. The lower frequencies provide better penetration and better detection of misaligned planar discontinuities. For a particular examination select the frequency based on the material, the anticipated type of discontinuities, and other specified examination requirements.

9. Standardization of Equipment

9.1 Prior to examination, standardize the system in accordance with the written procedure. Reference standard material travel distance is normally selected for the thickness to be examined, or in the case of large cross sections, half-thickness tests from opposing entry surfaces may be more appropriate. Reference standards may be selected from the distance-amplitude sets listed in Practice E 127 or Practice E 428 or may be fabricated as illustrated in Guide E 1158.

9.2 Where there is a difference in acoustic attenuation between the reference block and the production item, an attenuation correction is required to compensate for the difference. The attenuation correction is accomplished by noting the difference between signals received from the back surfaces of the reference block and the production material having equal thickness, and correcting for this difference.

9.3 Initial Standardization:

9.3.1 Standardization using the production part as the reference standard. Examinations may be conducted using the production part as the reference standard. This technique generally applies to simple solid shapes with parallel or diametrically opposing surfaces. Using the gain control, the amplitude of the initial back echo reflection is established as a percent of full screen height, normally 80 %, and this setting is used to examine the part. This technique is suitable for the detection of planar discontinuities generally parallel to the entry surface and having a minimum extent equal to an appreciable fraction of the cross sectional area of the transducer beam.

9.3.1.1 For some materials, attenuation curves or overlays that fit over the display, and charts, such as (AVG/DGS) showing distance-amplitude relationships of known reflectors

are available. These techniques utilize information derived theoretically or empirically and are specific to search unit size and frequency. The AVG-DGS system provides a summary of the anticipated behavior of small and large reflectors and can be used to analyze the reflecting area of discontinuities as compared to the back-echo reflection.

9.3.2 *Standardization*—Determine the distance amplitude relationship for the required set of distance-amplitude reference blocks by positioning the search unit over the reference block that provides the greatest amplitude response from the reference reflector. Adjust the instrument controls (for the instruments so equipped), that is: pulse length, pulse repetition rate, damping, frequency, and tuning to achieve the required resolution. The reject control shall be in the off position. Maximize the indication from the reference block which provides the greatest amplitude response from the reference reflector by carefully positioning the transducer; adjust the gain control to set the amplitude response at 80 % of the upper vertical linearity limit. Without changing the instrument controls, maximize the amplitude of the reference reflector from each of the remaining reference blocks in the set and mark their amplitude and horizontal sweep positions on the display. Connect these points to form a curve. A typical distance amplitude curve is shown in Fig. 1.

NOTE 2—A common practice is to connect the adjacent amplitude points with straight lines. Normally, the curve is extrapolated to form a smooth curve or a straight line continuing at the same slope as the previous data points until meeting the base line.

9.3.2.1 *Distance/Amplitude Gate (DAG)*—If the instrumentation includes a flaw-gate alarm system in which the alarm threshold can be time-varied as a function of target depth, the gate can serve both as an alarm and means for distance-amplitude compensation. The alarm level is adjusted to correspond to the distance-amplitude curve established by the procedure in 9.3.2. The method used depends on the specific features provided and the related operational instructions. In a system which directly displays the alarm level on an alternate trace at the corresponding screen amplitude, then it is (only)

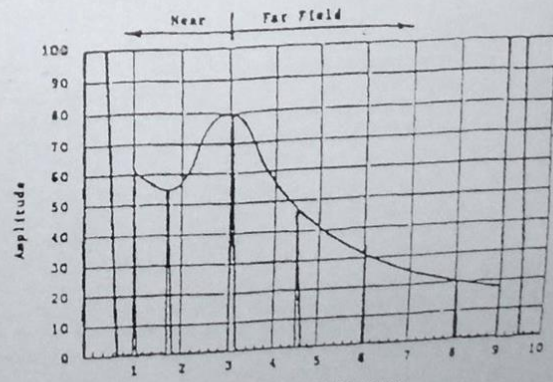


FIG. 1 Typical Calibration Curve

necessary to adjust this trace to coincide with the curve previously marked on the display.

9.3.3 Standardization with Distance-Amplitude Compensation—This is achieved by the use of electronic circuitry referred to as: time-variable amplifier gain typically called distance amplitude correction (DAC), distance echo correction (DEC), time varying gain (TVG), time corrected gain (TCG), or sensitivity time control (STC). Following the manufacturer's instructions for the specific instrumentation, adjust the instrument controls so that the indication amplitude of the reference reflector from each block is approximately equal. Normally, the amplitude for the reflector from the block with the lowest response is set at 80 % of the upper vertical linearity limit using the gain control and all the other responses are adjusted using the electronic circuitry controls.

9.4 It should be recognized that near-field effects may cause sensitivity inconsistencies when searching for discontinuities smaller than the effective beam diameter. Suitable delay-line search units, or other means such as examination from opposite sides of the item, should be considered where the application requires close scrutiny. When performing examinations in the far field, it is recommended that compensation be made for the acoustic attenuation of the material with respect to the reference standard used to set the inspection sensitivity. For optimum examination performance, compensation should be made for both near-, and far-field effects.

9.5 For bond/unbond (fusion/lack of fusion) examinations, a reference standard shall be used that is geometrically and acoustically similar to the production item being examined and shall contain areas representing both bond (fused) and unbonded (not fused).

9.6 Standardization with respect to reference standards shall be checked periodically to ensure that the ultrasonic system is not changing. As a minimum, the system shall be checked each time that there is a change in operators, search unit, cable, power source (including new batteries) or when equipment malfunction is suspected.

9.6.1 Criteria shall be established for acceptable rechecks and equipment not meeting the criteria shall be removed from service. All material examined since the last acceptable recheck shall be re-examined.

10. Procedure

10.1 The initial pulse and at least one back reflection shall appear on the display while examining for discontinuities in materials having parallel surfaces and diametrically opposing surfaces. The total number of back reflections depends on equipment, geometry and material type, information desired, or operator preference. Reduction of an (unsaturated) back reflection or the (multiple back reflection pattern), during scanning is indicative of increased attenuation or scattering of the sound beam by discontinuities, provided that the front and back surface roughness and parallelism of the production piece is approximately the same as that of the standard. A back-gated attenuator may be used to provide an unsaturated back reflection during high-sensitivity examinations.

10.2 Examination Surface—Surfaces shall be uniform in surface finish and free of loose scale and paint, weld spatter dirt, machining chips, and other foreign material. Waviness,

pits, gouges, and handling marks shall be such as to not interfere with the examination. Tightly adhering paint, scale, or coatings may not necessarily need to be removed provided they present uniform attenuation characteristics. The examination surface must be adequate to permit ultrasonic examination at the specified sensitivity. If necessary, surfaces may be ground, sanded, wire brushed, scraped, or otherwise conditioned for the examination. Curved surfaces, either convex or concave may be examined, however, the standardization system should compensate for the effective change in the examination area, and the propagation of a range of refraction angles in the material, as compared to a flat reference standard.

10.3 Search Unit—The search unit frequency, unless otherwise specified is selected to provide the resolution and penetrability required for the examination. The acoustic properties of the material and the minimum size and type of discontinuity must be considered when selecting frequency. Higher frequencies will provide greater sensitivity and resolution capabilities, but lesser penetration power; conversely, lower frequencies provide greater penetration power, but lesser sensitivity and resolution. Factors limiting the use of higher frequencies are the equipment and material properties. Use of lower frequencies is limited primarily by the loss of sensitivity. Geometry of the part is the primary consideration for selecting the size of the search unit; however, like frequency, the size of the search unit also affects resolution and length of the near and far fields. Various types of straight-beam search units are commercially available offering advantages for specific applications. The above statements should be considered when choosing the search unit size, type, and frequency. When delay materials are used in the search unit, the standards and the examination surface temperatures should be maintained within 25°F [14°C] to avoid large attenuation and velocity differences.

NOTE 3—The largest diameter and highest frequency search units yielding the desired results should be used for maximum resolution and good beam directivity.

10.4 Scanning—Scanning is accomplished using the same instrument settings as used for standardization. Scanning may be either continuous or intermittent, depending on the geometry, application, and specific requirements for the part being examined. For continuous scanning, the search unit indexing or overlap must be adequate to provide for 100 % coverage, at an examination sensitivity throughout the thickness of the part that does not vary more than 10 % from that determined by optimizing on each of the reference reflectors. Monitor coupling of the search unit to the part visually by continually monitoring the display presentation. Adjust scanning speed or pulse repetition rate, or both, to permit detection of the smallest discontinuity referenced in the applicable specification. When desired or required, set the threshold level of the discontinuity alarm at an agreed level below that of the reference response or exceeding a present threshold level of the discontinuity alarm.

10.4.1 Back-Reflection Monitor—If desired or required the back reflection may be monitored by adjusting the back-reflection echo at an amplitude in the unsaturated range (on display). This adjustment may be accomplished using the gain

adjustment or with instruments so equipped, using the back echo gain adjustment that is normally part of the back echo alarm circuitry.

10.4.2 *Manual Scanning*—Parts may require 100 % volumetric examination or may require examination only in specified areas. For the area to be examined, mark the part into grids. Hold the search unit in the hand and move over the surface of the production piece, index the search unit, and continue until the entire grid has been scanned. Place an "X" in the grid indicating completion and scan the next grid. Continue until the entire part has been scanned.

10.4.3 *Automatic Scanning*—The search unit is held by a suitable device and the production part is scanned along a predetermined path, by holding the part stationary while moving the search unit, or by moving the part in relation to a stationary search unit, or both. For automatic scanning, monitor coupling between the search unit and the part by monitoring the noise level or the back-echo amplitude, or both, or back-echo pattern.

10.4.3.1 *Recorders*—Automatic scanning systems may provide A-Scan, B-Scan, and C-Scan recordings of the examination results with sufficient accuracy to permit locating the regions of a part, from which indications were obtained, without actually placing a mark on the part.

10.4.4 *Indications*—As scanning progresses, mark on the part the locations of indications having amplitudes greater than one half of the reference response, or exceeding the threshold of the discontinuity alarm.

10.4.5 *Loss of Back Reflection*—As scanning progresses mark on the part the locations at which the back reflection is below the specified value. Determine that the loss of back reflection is not caused by part geometry or local surface roughness. Local surface roughness shall be conditioned in accordance with 8.1.

11. Evaluation of Discontinuities

11.1 When ultrasonic examinations are performed for the detection or evaluation of discontinuities, or both, reflectors not perpendicular to the ultrasonic beam may be detected at reduced amplitudes, with a distorted envelope depending upon the reflective area, whether it is curved or planar, whether it is smooth or rough, perhaps with reflecting facets. Reflector characteristics may also cause rapid shifts in apparent depth as the search unit approaches or moves away from the low-amplitude indication. Another effect of these reflectors is the loss of back surface reflection which occurs when the discontinuity lies directly between the search unit and the back surface. Reflectors detectable due to any of the foregoing phenomena cannot be evaluated solely on signal amplitude and may require evaluation using different frequencies and angled waves in order to obtain the maximum extent of the discontinuity.

11.2 During the evaluation of indications, maintain the same relative gain between the reference standard and the production part. Make an evaluation of indications after obtaining the depth and the maximum obtainable amplitude response from the discontinuity. Indications are normally evaluated by comparing the amplitude response from the discontinuity with the

amplitude of a known reference reflector having approximately the same material distance.

11.2.1 The known reference reflector may be contained in a reference block, may be machined in the part under test or may be the part itself. The actual reflector may be a flat-bottomed hole, side-drilled hole, or notches. The reference reflector may also be the initial back echo or back echo pattern obtained from the part under test. Charts and curves, such as AVG-DGS may be used to compare amplitude indications from two reflectors when using the back-reflection technique.

11.3 Map discontinuity extremities larger than the search unit size. The half-amplitude technique is recommended for mapping the apparent size (that is the reflecting surface seen by the search unit) of discontinuities larger than the search unit. To perform this technique, position the search unit over the discontinuity such that maximum signal is obtained and note the amplitude. Move the search unit in one direction until the signal drops rapidly to the baseline on the display. Move the search unit back along the same path until the signal rises to one half of the maximum amplitude that was noted. Place a mark on the part to coincide with the center position of the search unit; this mark will also coincide with the approximate edge of the discontinuity. Repeat this procedure for other directions as necessary to outline the discontinuity on the surface of the part. Search units of different sizes and frequencies may be used for mapping to obtain greater accuracy. Special consideration shall be given to discontinuities when the signal amplitude drops to half the maximum amplitude and less, and remains at the lower amplitude over extended distances (for example; more than half the search unit diameter) and continuous discontinuities that move horizontally along the base line (change in depth) as the search unit is scanned along the part.

12. Report

12.1 Document specific examination requirements, procedural details, and results for a particular examination in written contractual agreements, procedures, and reports. Include the following items in the examination report:

- 12.1.1 Part identification,
- 12.1.2 Operator's name and certification level,
- 12.1.3 Disposition of part and disposition date,
- 12.1.4 Instrument make, model, and serial number,
- 12.1.5 Search unit make, model, serial number, frequency, and diameter,
- 12.1.6 Couplant, cable type and length, manual/automatic scanning,
- 12.1.7 Reference standard serial number(s), material travel(s) and flat-bottomed hole size(s),
- 12.1.8 Standardization levels,
- 12.1.9 Procedure identification and acceptance criteria applied,
- 12.1.10 Attenuation correction, if applicable, and
- 12.1.11 Description of indications detected; number, type, estimated size (minimum), length, depth, and location. For unbond and lack of fusion examinations report extent of unbond/lack of fusion as percent of total surface area.