

00368

1

24



**Universidad Nacional Autónoma  
de México**

**Facultad de Ciencias**

**Diseño e integración de un sistema para la  
evaluación de materiales utilizando métodos  
ultrasónicos**

RECEIVED  
1988  
FEB 10

**T E S I S**

**Que para obtener el grado de  
Maestro en Física de Materiales**

**p r e s e n t a**

**Pablo Mauricio Calva Valderrabano**

**México, D. F.**

**1988**

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



## **UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso**

### **DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

## PROLOGO

Durante los últimos años el uso de nuevos materiales y la necesidad de someterlos a condiciones de trabajo más crítico han provocado un avance repentino en la Tecnología de Calidad. Aunado esta demanda con el avance en las nuevas tecnologías en computación y en la instrumentación electrónica, se ha propiciado la aparición de una nueva generación de "herramientas" para la evaluación de los materiales.

Lejos de haberse encontrado el procedimiento más adecuado, actualmente se libra una desesperada batalla de recursos para aumentar la confiabilidad de las técnicas de inspección existentes y para el desarrollo de nuevas tecnologías.

Concientes de esta realidad el Instituto de Investigaciones Eléctricas inició hace cinco años la instalación del primer Laboratorio para el Desarrollo de Pruebas no Destructivas, con la tarea de asimilar la ciencia y la técnica asociada a estas pruebas y promover su aplicación y desarrollo en nuestro país. Desde ese entonces, formo parte de este grupo de trabajo.

Siendo las técnicas Ultrasonicas de inspección las de mayor aplicabilidad en las Centrales de Generación Eléctrica, no es raro que haya sido en esa dirección nuestro mayor desarrollo, aunque actualmente ya se esten incorporando otras tecnologías.

En este trabajo se diseñó e integró un sistema experimental que permite la evaluación de las técnicas ultrasónicas actuales y el desarrollo de nuevas tecnologías para la evaluación de materiales, siendo el diseño de una metodología para la adquisición y el análisis de la información ultrasónica la contribución de este trabajo.

Quiero aprovechar la oportunidad para agradecer la dirección de este trabajo al M.C. Rufino Díaz Uribe. Así como la confianza del Dr. Alejandro Peraza, Jefe del Departamento de Combustibles Fósiles del JIE; del Dr. Raul Fuentes Samaniego iniciador de esta idea; y del Dr. Marcus Ley-Koo actual coordinador y guía de este Laboratorio.

Pablo Mauricio Calva Valderrábano  
Diciembre de 1988.

## CONTENIDO:

<b>CAPITULO 1.</b>	<b>INTRODUCCION ; LA EVALUACION CONFIABLE DE LOS MATERIALES .....</b>	<b>1</b>
1.1	LA CALIDAD Y LA INSPECCION .....	1
1.2	IMPERFECCIONES EN LOS PRODUCTO .....	2
1.2.1	Materias primas y Semielaborados .....	2
1.2.2	Procesos de Manufactura y Ensamble .....	2
1.2.3	Inspección durante Servicio...	2
1.3	PROCEDIMIENTOS Y ALCANCE DE LAS INSPECCIONES .....	3
1.4	CRITERIOS DE ACEPTACION Y RECHAZO .....	5
1.4.1	Consideraciones de la Mecánica de Fracturas en la evaluación de discontinuidades.....	5
1.4.2	Determinación de criterios en soldaduras .....	6
1.5	BIBLIOGRAFIA .....	12
<b>CAPITULO 2.</b>	<b>METODOS DE EVALUACION NO DESTRUCTIVA .....</b>	<b>15</b>
2.1	INTRODUCCION .....	15
2.2	INSPECCION VISUAL .....	16
2.3	TECNICAS SUPERFICIALES .....	17
2.4	CORRIENTES INDUCIDAS .....	20
2.5	RADIOGRAFIA .....	22
2.6	METODOS ACUSTICOS .....	24
2.7	NUEVAS TENDENCIAS EN LOS METODOS NO DESTRUCTIVOS .....	29
2.8	BIBLIOGRAFIA .....	30
<b>CAPITULO 3.</b>	<b>MODELOS DE LA PROPAGACION DE LAS ONDAS ULTRASONORAS EN SOLIDOS .....</b>	<b>32</b>
3.1	INTRODUCCION .....	32
3.2	MODELO ELASTICO DE PROPAGACION ULTRASONICA .....	32
3.2.1	Ecuaciones de Movimiento en los medios elásticos. Ondas longitudinales y Transversales .....	33
3.2.2	Ondas Superficiales .....	37
3.2.3	Reflexión y Refracción de ondas elásticas .....	37

3.3	METODO ULTRASONICO PULSO-ECO .....	43
3.4	MODELO DE ANALISIS POR DIFRACCION ....	45
3.4.1.	Modelo de Kirchoff para la Difracción Ultrasonica .....	48
3.4.2	Difracción en superficies de Geometría Regular .....	51
3.5	OTROS RESULTADOS OPTICOS QUE PERMITEN EXPLICAR EL COMPORTAMIENTO ULTRASONICO 54	
3.5.1	Divergencia del Haz Ultrasonico	54
3.5.2	Longitud de la Zona de Difracción de Fresnel .....	55
3.6	VISUALIZACION DE DISCONTINUIDADES ....	55
3.6.1	Holografia Acústica .....	56
3.6.2	Tomografia Acústica .....	56
3.6.3	Reconstrucción por enfoque sintético .....	56
3.6.4	Aplicaciones al sistema experimental .....	60
3.7	BIBLIOGRAFIA .....	60
CAPITULO 4	DESCRIPCION DEL SISTEMA EXPERIMENTAL ...	62
4.1	INTRODUCCION .....	62
4.2	CONFIGURACION DE UN SISTEMA ULTRASONICO .....	62
4.3	TRANSDUCTORES PIEZOELECTRICOS Y EXCITACION .....	67
4.4	SISTEMA DE ADQUISICION Y MEDICION ...	69
4.5	SISTEMA DE COMUNICACION Y DE COMPUTO	70
4.6	SISTEMA AUTOMATICO DE POSICIONAMIENTO	71
4.7	SISTEMA DE PROGRAMACION .....	72
4.7.1	Presentación Gráfica de Defectos por Técnicas de Pulso-Eco	76
4.7.2	Procesamiento de señales en el dominio de la frecuencia .....	78
4.8	NUEVAS TENDENCIAS .....	84
4.9	BIBLIOGRAFIA .....	85
CAPITULO 5.	ALGUNOS RESULTADOS DE LA APLICACION DEL SISTEMA EXPERIMENTAL .....	86
5.1	INTRODUCCION .....	86

5.2	PRESENTACION GRAFICA DE DISCONTINUIDADES UTILIZANDO EL MODELO ELASTICO Y LA TECNICA PULSO-ECO .....	86
5.3	ANALISIS DE LA SERAL ACUSTICA PRODUCIDA POR LA INTERACCION DE UN HAZ ACUSTICO CON TRES GEOMETRIAS DIFERENTES .....	91
5.4	ANALISIS DE LAS SEÑALES DE ACUERDO AL MODELO DE KIRCHOFF .....	93
5.4.1	Aplicación de Filtros Digitales .....	95
5.4.2	El efecto de las bajas frecuencias en la caracterización de discontinuidades ...	99
5.4.3	Alternativas propuestas para continuar este desarrollo ..	100
5.5	BIBLIOGRAFIA	

CAPITULO 6 CONCLUSIONES

APENDICE I

MANUAL DE USUARIO  
SISTEMA PARA EL ANALISIS DE SEÑALES ULTRASONICAS

A1.1	CARACTERISTICAS GENERALES .....	A-1
A1.2	DESCRIPCION .....	A-1
A1.3	CONSIDERACIONES GENERALES PARA EL USUARIO .....	A-2
A1.4	INICIO DEL PAQUETE .....	A-2
A1.5	CONDICIONES INICIALES .....	A-3
A1.6	CONTROL DE INSTRUMENTOS .....	A-4
A1.7	PRESENTACION GRAFICA .....	A-4
A1.8	PROCESAMIENTO DE SEÑALES .....	A-5

## CAPITULO 1. INTRODUCCION ; LA EVALUACION CONFIABLE DE LOS MATERIALES

### 1.1 LA CALIDAD Y LA INSPECCION

Los materiales, como la naturaleza misma, lejos de ser perfectos, presentan siempre "pequeños ó grandes defectos"; de hecho, es imposible hablar de un material libre de discontinuidades.

Una de las principales tareas de la Física de Materiales es ofrecer nuevas alternativas de evaluación de materiales, de tal forma que, tanto el diseñador como el constructor y el usuario, estén seguros de que los materiales van a soportar las condiciones de operación a las que son sometidos.

Al diseñar y manufacturar un equipo ó sistema, la idea al final de cuentas, es ofrecer "calidad", que en términos generales podemos relacionar con la "confiabilidad" y la "disponibilidad" del bien ó servicio.

De esta forma lo que busca el usuario de los materiales, es que el cliente repita su elección sobre su producto, ó en otro caso, impedir que su planta pierda por paros imprevistos, ponga en entredicho la seguridad del sistema, y no aproveche la capacidad total instalada.

Podemos darnos cuenta entonces, de la gran importancia que tienen los procedimientos que permiten la evaluación "confiable" y "objetiva" de los materiales. La ausencia de ellos, ó su deficiencia, nos orilla a sufrir todas las consecuencias provocadas por la falta de calidad.

Se sabe que los gastos relacionados con el control de calidad de un producto ó de un servicio muchas veces alcanzan una buena parte del valor total del bien, lo que representa cantidades verdaderamente importantes en la industria, en especial en aquella en que la seguridad pública se ve amenazada por las instalaciones, como es el caso de las Centrales Nucleares, las aeronaves, etc.

Mejorar la calidad de nuestros productos es la única alternativa para aumentar su competitividad a nivel mundial, el precio reducido pocas veces es un factor determinante para ganar mercado. Es muy importante para países como el nuestro reconocer ésta necesidad y proponer alternativas para establecer programas concretos de evaluación confiable de los materiales.

Dentro de los procedimientos de evaluación de materiales, las PRUEBAS NO DESTRUCTIVAS son las únicas que cumplen con los criterios de control total de calidad; y que por lo tanto resuelven en forma integral el problema de la calidad de los materiales, productos, equipos y plantas industriales.

Aumentar la confiabilidad de las Pruebas no Destructivas es la principal tarea de los laboratorios e investigadores que se dedican al desarrollo de la Tecnología de Calidad, ya que de esta confiabilidad depende el éxito para dominar y transformar los materiales en beneficio de todos.

## 1.2 IMPERFECCIONES EN LOS PRODUCTOS

La transformación de las materias primas en productos útiles implica un proceso de manufactura más ó menos complicado, y cada uno de los pasos que intervienen pueden ser fuente de imperfecciones. [1,2].

Este proceso de transformación puede resumirse en: selección de materias primas, manufactura, y ensamble.

Como ejemplo consideraremos los aceros, ya que representan un caso general y de gran aplicación por su elevada participación en la industria en general. Los utilizaremos para demostrar los factores que deben considerarse en su proceso de integración hasta lograr un producto terminado comercial de "calidad", que cumple requerimientos de servicio específicos.

Este ejemplo no limita la aplicación de nuestros conceptos a otro tipo de materiales, como los plásticos, cerámicas, materiales compuestos, ó incluso materiales biológicos.

La "calidad" de los aceros se establece por las propiedades tecnológicas que se le atribuyen [1]. Es decir, de su composición química, de la calidad siderúrgica que se le ha dado durante el proceso de elaboración, y de la estructura conseguida durante los tratamientos térmicos ó mecánicos a que haya sido sometido. Por ejemplo, los aceros especiales, deben satisfacer exigencias estrictas y uniformes de pureza química, propiedades físicas y termodinámicas.

A final de cuentas estas características se reflejan en la resistencia mecánica, formabilidad, maquinabilidad, soldabilidad, resistencia a corrosión, etc. que se requieren durante la manufactura ó el servicio final del producto.

### 1.2.1 Materias Primas y Semielaborados

La presencia de gases ó inclusiones no metálicas en el interior de los semielaborados, es el tipo de imperfecciones

más frecuentes, y es determinante en la calidad de los artículos terminados.

Es importante pues, llevar a cabo todos aquellos procedimientos de verificación de calidad al seleccionar la materia prima de nuestros procesos, y no permitir la entrada de material defectuoso en los almacenes.

### 1.2.2. Procesos de Manufactura y Ensamble

Después de su fabricación, los productos semielaborados son sometidos a procesos de terminado, que incluyen los métodos de arranque y de no arranque de viruta.

Dentro de los primeros podemos encontrar esencialmente el maquinado con herramientas como sierras, cepillos, tornos, fresadoras etc. Y en los segundos están la fundición, laminado, y forja.

Asimismo, intervienen otros procesos denominados de ensamble, que abarcan principalmente la soldadura y el armado con tornillería y remaches.

La soldadura debe ser evaluada en forma cuidadosa ya que en este proceso aparecen la mayoría de las imperfecciones que se encuentran en los productos terminados. Esta característica es quizá alentada por la falta de condiciones "óptimas" para realizar tan delicada tarea, especialmente en las soldaduras realizadas en campo.

La presencia de discontinuidades en las soldaduras es la principal fuente de fallas. [4]

La variedad de discontinuidades que se pueden producir durante la soldadura son enormes y pueden ser: fisuras, inclusiones, defectos de forma, falta de fusión y penetración etc. lo que dificulta su detección e identificación, siendo ésta labor de evaluación de soldaduras una de las más difíciles y a la vez una de las más importantes.

### 1.2.3. Inspección durante Servicio

Una vez que un producto es puesto en servicio, se inicia su deterioro. La evaluación de la "vida residual" de un material ó producto es la principal tarea de toda la labor de análisis, mantenimiento é inspección. [5,13].

Durante la inspección en Servicio, los criterios de búsqueda de discontinuidades, de interpretación y recomendaciones es necesariamente diferente a los seguidos durante construcción; a pesar de esto muchas de las normas internacionales siguen utilizando lo que se llama "criterios cerrados" de evaluación. Esto sucede en la mayoría de las normas de aplicación industrial por ejemplo de ASME, ASTM, API, etc. [8,10].

Veremos ahora cuales son los criterios para diseñar un procedimiento de inspección y cuales son los parámetros y resultados que debemos esperar de ellos.

### 1.3 PROCEDIMIENTOS Y ALCANCE DE LAS INSPECCIONES

Hasta ahora hemos establecido la importancia de las inspecciones para determinar la calidad de un material ó de un objeto.

Uno de los aspectos más importantes de la inspección es la determinación de las zonas que presentan mayor probabilidad de falla, los intervalos de tiempo entre cada una de las inspecciones y el alcance de las mismas.

La determinación de estos parámetros junto con la selección de los criterios de aceptación y rechazo, forma en conjunto lo que se llama el "procedimiento de inspección".

Al final de cuentas al diseñar un procedimiento se intenta ofrecer una evaluación "objetiva" del estado en que se encuentra un material, objeto ó instalación industrial.

La selección de los puntos y el alcance de las inspecciones debe hacerse siguiendo los análisis efectuados durante el diseño, de tal forma que se puedan detectar y proponer un programa de inspección para cada zona. Así mismo, la información de operación es de suma importancia, ya que así podremos hacer un seguimiento cuidadoso de las zonas que son consideradas "críticas". [13].

En la actualidad destacan dos filosofías para la elaboración de procedimientos de inspección y son: "control total de calidad" ó "aseguramiento de calidad" en la etapa de manufactura, y la otra "mantenimiento predictivo" durante servicio.

Control total de calidad [2] se refiere al diseño de un sistema que permita la evaluación de los materiales ó productos en cada una de las etapas de fabricación, de tal forma que cada uno de los fabricantes sea responsable de la calidad de los insumos que agregan, estableciendo un sistema de información para asegurar dicha calidad y verificarla retrospectivamente durante la vida del material.

Por otro lado el mantenimiento predictivo [5] se refiere al establecimiento de un programa que permita la utilización máxima de los equipos y materiales de las instalaciones industriales. Una evaluación objetiva y confiable, así como el monitoreo permanente de las variables más importantes nos indicará el momento justo de retirar una pieza.

Haciendo uso de estos criterios, durante una inspección,

4

se pretende recabar la mayor cantidad de información posible con el fin de presentar un panorama "confiable" sobre el estado en que se encuentra determinado material, pieza, equipo ó sistema en general.

Este tipo de pensamiento ha sido profusamente aplicado en las industrias en las que existe un gran riesgo social, como son : la construcción y operación de centrales nucleares, la construcción y operación de aeronaves, la construcción y operación de plantas petroquímicas etc. y cada día es mayor el número de empresas que adoptan este tipo de filosofías. [2].

El alcance de una inspección está determinado por el tipo de pruebas, y técnicas de evaluación que se realizan durante la inspección. [4] Estas se seleccionan y diseñan de tal forma que revelen claramente los parámetros ó variables que son fundamentales para la toma de decisiones. Por ejemplo, un parámetro importante puede ser el espesor de la pared de un tanque que guarda sustancias letales al ser afectado por la corrosión [14] ; ó la velocidad de propagación de una grieta en los soportes de un motor de jet; etc.

Algunas de las pruebas que se incluyen durante estos servicios de inspección son: Análisis de composición; verificación de microestructura; control en los procedimientos de manufactura y ensamble; evaluación dimensional; pruebas mecánicas de tensión, fatiga etc.; medición de esfuerzos superficiales; métodos no destructivos como inspección visual, métodos magnéticos, radiografía, ultrasonido etc.; exposición de la pieza a condiciones de operación reales ó condiciones límite para verificar su funcionalidad.

A final de cuentas lo que se espera de una inspección es información que establezca la condición en la que se encuentra el material ó el equipo, para poder "predecir" su vida útil residual [5]. Con esta información se puede hacer planeación sobre las compras, reparaciones y reemplazos, con todas las ventajas que una planeación implica.

De la información específica obtenida durante una inspección es determinante la que se refiere a la presencia de "discontinuidades" en el interior del material, ya que como vimos en la sección anterior, los procesos de manufactura y ensamble propician la aparición de ellos.

A continuación analizaremos el papel que juegan las discontinuidades en el comportamiento de los materiales. La pregunta pendiente es: si bien los materiales resentan discontinuidades, Como podemos establecer la gravedad de estas , y - cuales criterios debemos seguir para aceptar ó rechazar un producto que presenta discontinuidades.

#### 1.4 CRITERIOS DE ACEPTACION Y RECHAZO ; ADECUACION A SERVICIO E INGENIERIA DE EVALUACION CRITICA

Los criterios que se establecen para determinar los límites de "discontinuidades" permisibles en los productos se determinan con base en tres puntos de vista diferentes:

a) la calidad como búsqueda de perfección en la manufactura, es decir, la ausencia total de discontinuidades;

b) criterios "cerrados", basados en consideraciones de uso general, por ejemplo, no permitir fisuras ó defectos "planos" como faltas de fusión ó laminaciones; pero aceptar cantidades "razonables" de defectos de volumen como inclusiones de escoria y porosidad.

c) la adecuación del objeto al servicio para el que será empleado. Es decir, ninguna "discontinuidad" (heterogeneidad), debe ser considerada como "defecto" a menos que no permita la utilización del objeto en las funciones que han sido determinadas por el diseñador del mecanismo ó sistema.

La tercera alternativa es la de creación más reciente y posee un respaldo tecnológico más fuerte. A esta metodología se le llama "adecuación a servicio", y de hecho constituye la tendencia actual para establecer los criterios de aceptación y rechazo.

La adecuación a servicio pues, permite la presencia de discontinuidades tales como porosidad, inclusiones metálicas ó no metálicas, faltas de fusión, desgarres, ralladuras superficiales e incluso fisuras, siempre y cuando ni su número, concentración, dimensiones ó posición en la pieza afecten su funcionamiento dentro de los criterios de diseño. [9].

Este modo de pensar abre sin lugar a duda la aplicabilidad de piezas que si bién no son "perfectas" se encuentran dentro de ciertos límites de calidad establecidos.

##### 1.4.1 Consideraciones de la Mecánica de Fracturas en la evaluación de discontinuidades. [12,9].

El diseño mecánico de los objetos es capaz de determinar exactamente el tipo de material y las dimensiones necesarias para soportar esfuerzos y deformaciones estáticas ó cíclicas.

Sin embargo, cuando existe alguna discontinuidad en el material, estos métodos son incapaces de preveer su comportamiento, como : la resistencia del material de acuerdo con la posición, dimensiones y geometría de la discontinuidad; las dimensiones tolerables de las mismas; su velocidad de propa-

gación; ni la frecuencia de inspección para ser detectadas.

El tipo de análisis que se efectúa para incluir los efectos de las discontinuidades en los materiales se conoce como Mecánica de Fracturas.

El principio básico de la mecánica de fracturas habla de la concentración de esfuerzos que ocurre en la vecindad de las discontinuidades, de tal forma que de acuerdo con los conceptos de: proporción de energía liberada por deformación, factores de intensificación de esfuerzo, energía de superficie, y energía de deformación elástica y plástica, es posible responder a las interrogantes planteadas.

Los análisis de mecánica de fractura están soportados en estudios experimentales realizados a los materiales y a los objetos fabricados, de tal forma que se puedan establecer con claridad los conceptos mencionados.

De esta forma se determinan los tamaños máximos permisibles de "grietas" en cada una de las zonas del objeto fabricado, e incluso es posible determinar la velocidad de propagación de las grietas y las direcciones preferenciales para ello.

Las técnicas de inspección no destructiva juegan un papel primordial en este análisis, ya que es la única forma en que podemos verificar la presencia de las discontinuidades y establecer sus características geométricas y dimensionales.

La información suministrada por la prueba no destructiva permite: -por su localización en el interior, determinar el estado de esfuerzo en el que se encuentra sometida la discontinuidad; - por su geometría y dimensiones, establecer los factores de intensificación de esfuerzos.

Mientras mayor claridad y precisión se den en los resultados obtenidos de las evaluaciones no destructivas, mayor posibilidad de éxito tendrá la mecánica de fracturas en sus determinaciones.

#### 1.4.2 Determinación de criterios de evaluación en Soldaduras

Como vimos en secciones anteriores, dentro de los procesos de transformación, la soldadura es el que se utiliza con mayor frecuencia; pero a su vez es el que origina el mayor número de discontinuidades. Por esta razón, ha sido un punto de preocupación de los organismos e instituciones encargados de dictar los estándares de aceptación; y la tomaremos como ejemplo.

La evaluación de soldaduras normalmente está soportada en "buenas prácticas de taller" ó condiciones de "soldadura

práctica". Sin embargo estos pueden ser inadecuados ó demasiado conservadores cuando se trata de su desempeño en condiciones reales de esfuerzo y ambiente. Basados en estas consideraciones, la mayoría de las normas obligan a remover todas las fisuras mientras que permite la existencia de cantidades limitadas de otras discontinuidades como porosidad y escoria sin una razón evidente para ello. [8,10].

Existen en la actualidad algunas normas que ya hacen consideraciones de los análisis de Mecánica de Fractura, incluyendo: estados de esfuerzo, especificaciones del material y caracterización de discontinuidades para establecer los criterios de evaluación en soldaduras. Algunas de ellas son: [11]

1) La norma de los Estados Unidos, Código ASME "Reglas para la inspección en servicio de componentes de plantas nucleares" Sección XI.

2) La Norma británica, BSI PD6493-1980, "Guía sobre algunos métodos para la obtención de niveles de aceptación de defectos en juntas soldadas por fusión".

3) La Norma japonesa WES 2805-1980, "Método para la evaluación de defectos en juntas soldadas con respecto a fractura frágil".

Analizaremos con un poco de detalle la Norma Británica PD 6493:1980 que se llama "Guía en algunos Métodos para el establecimiento de niveles de Aceptación para Defectos en Juntas Soldadas por Fusión", [9] en ella se establece un modelo para el diseño de normas de control basado íntegramente en los criterios de la Ingeniería de Evaluación Crítica.

Este documento habla sobre los criterios de clasificación de discontinuidades y de modos de falla, se establece la rutina de evaluación de las discontinuidades, y se hace referencia a las dimensiones de las discontinuidades obtenidas durante la inspección, de tal forma que al ser evaluados por Mecánica de Fracturas se establezca si representan un riesgo grave para el funcionamiento "seguro" del material.

En el contenido de esta norma se hace referencia a una gran cantidad de parámetros para la caracterización de las "discontinuidades", es decir, debe establecerse claramente:

- geometría de la discontinuidad (plana ó volumétrica)
- dimensiones de los defectos ( Ver figura 1.)
- interacción entre los defectos, basados en su posición dentro del material y las dimensiones relativas entre ellos.

(Ver figura 2.).

Utilizando este tipo de modelos de decisión ó algunos

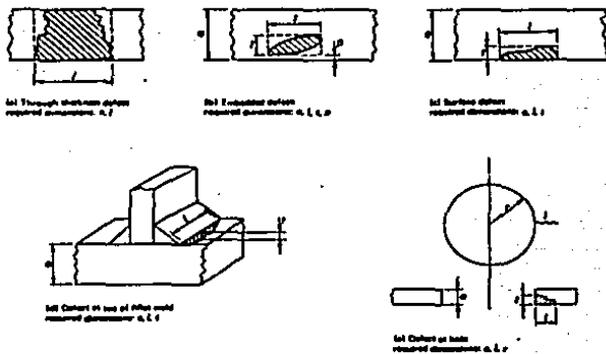
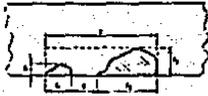
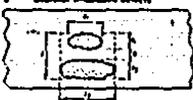
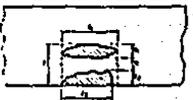
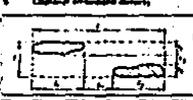
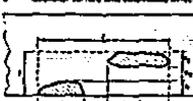


Figure 4. Defect geometries

FIGURA 1. Dimensiones de los Defectos.

Interacting defects	Criterion for interaction	Effective dimension of the combination
1 Coplanar surface defects 	$s < \frac{l_1 + l_2}{2}$	$l = l_2$ $l = l_1 + l_2 + s$
2 Coplanar embedded defects 	$s < \frac{l_1 + l_2}{2}$	$l = l_1 + l_2 + s$ $l = l_2$
3 Coplanar embedded defects 	$s < \frac{l_1 + l_2}{2}$	$l = l_2$ $l = l_1 + l_2 + s$
4 Coplanar surface and embedded defects 	$s < \frac{l_1}{2} + l_2$	$l = l_1 + l_2 + s$ $l = l_1$
5 Coplanar embedded defects 	$l_1 < \frac{l_1 + l_2}{2}$ and $l_2 < \frac{l_1 + l_2}{2}$	$l = l_1 + l_2 + s_1$ $l = l_1 + l_2 + s_1$
6 Coplanar surface and embedded defects 	$l_1 < \frac{l_1 + l_2}{2}$ and $l_2 < l_1 + \frac{l_2}{2}$	$l = l_1 + l_2 + s_1$ $l = l_1 + l_2 + s_1$

(a) Coplanar

Figure 5. Planar defect interactions

FIGURA 2 Interacciones entre Defectos Planos

FIGURA 2 (cont) . Interacciones entre Defectos Planos

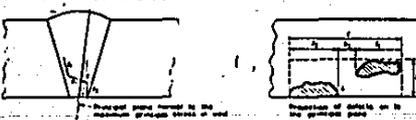
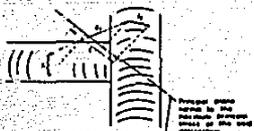
Defectos de forma	Criterios de interacción	El factor de interacción
<p>1 Adyacentes no superpuestas (defectos)</p>  <p>— Plano normal a la máxima tensión principal en el soldo</p> <p>Proyección de defectos en el plano principal</p>	$s_1 < \frac{l_1 + l_2}{2}$ <p>and</p> $s_2 < \frac{l_1 + l_2}{2}$ <p><math>l_1</math> and <math>l_2</math> are projected lengths</p>	<p>El factor de interacción</p> <p>El factor de interacción es el cociente de la altura mínima de un rectángulo construido en el plano normal a la máxima tensión principal en el soldo</p> $I = I_1 + I_2 + 0$
<p>2 Adyacentes superpuestas (defectos)</p>  <p>— Plano normal a la máxima tensión principal en el soldo</p> <p>Proyección de defectos en el plano principal</p>	$s_1 < \frac{l_1 + l_2}{2}$ <p>and</p> $s_2 < \frac{l_1 + l_2}{2}$ <p><math>l_1</math> and <math>l_2</math> are projected lengths</p>	<p>El factor de interacción</p> <p>El factor de interacción es el cociente de la altura mínima de un rectángulo construido en el plano normal a la máxima tensión principal en el soldo</p> $I = I_1 + I_2 + 0$
<p>3 Adyacentes superpuestas (defectos) y defectos de forma</p>  <p>— Plano normal a la máxima tensión principal en el soldo</p> <p>Proyección de defectos en el plano principal</p>	$s_1 < \frac{l_1 + l_2}{2}$ <p>and</p> $s_2 < \frac{l_1 + l_2}{2}$ <p><math>l_1</math> and <math>l_2</math> are projected lengths</p>	<p>El factor de interacción</p> <p>El factor de interacción es el cociente de la altura mínima de un rectángulo construido en el plano normal a la máxima tensión principal en el soldo</p> $I = I_1 + I_2 + 0$

Figura 2. Plano defect interacciones (cont)

Substructure Defects	Criterion for Interaction	Effective dimension after interaction
<p>4. Adjacent non-coplanar defects in intersecting planes</p>  <p>Principal stress vector in the maximum principal stress of the weld</p>  <p>Projection of defects on to the principal stress</p>	$x_1 < \frac{h_1 + h_2}{2}$ <p>and</p> $y_1 < \frac{h_1 + h_2}{2}$ <p>(<math>h_1</math> and <math>h_2</math> are projected heights)</p>	$z = \sqrt{z_1^2 + z_2^2}$ <p>z the maximum length of non-intersecting crackline constructed on the plane normal to the maximum principal stress in the weld</p>

©1 Iron-Anglomer

Figure 6. Plano-defectos interseccionados

otros equivalentes es la forma como se establecen los límites de aceptación y rechazo de discontinuidades en los productos, que en conjunto con la selección y el establecimiento de los alcances de las pruebas para evaluación, forman el "procedimiento de inspección". De esta forma el constructor puede demostrar al comprador del material ó equipo, que el producto que está adquiriendo soportará las condiciones de diseño, y que podrá planear su reparación ó retiro del servicio.

Es evidente de esta filosofía que los "criterios de rechazo aceptación" no pueden ser utilizados en forma indiscriminada, es indispensable evaluar las condiciones específicas en las que un material va a operar ó ha estado operando. Por ejemplo, no tiene sentido utilizar los mismos criterios de aceptación y rechazo durante la construcción de una planta que durante su servicio.

De acuerdo a toda esta forma novedosa de pensar es importante establecer las características de las discontinuidades, de tal forma que puedan determinarse los criterios de aceptación y rechazo con base en la mecánica de fracturas.

Analizaremos a continuación las técnicas convencionales de evaluación no destructiva, que nos dan información sobre las discontinuidades presentes en los materiales. Trataremos de verificar si estas técnicas nos ofrecen información como la requerida por la norma BS-PD 6493:1980 que hemos discutido previamente. Solo en ese caso, la podremos considerar adecuada para determinar "confiablemente" la condición de un material.

Posteriormente veremos que las técnicas convencionales son incapaces de cumplir estos requerimientos, por lo que es necesario continuar el desarrollo de estas tecnologías. En este trabajo se diseñará un sistema experimental, que permitirá proseguir esta labor, presentando una nueva metodología para la adquisición y el proceso de la información ultrasónica con el fin de lograr una técnica de evaluación de materiales que ofrezca la información requerida por los grupos de Mecánica de Fracturas para dar un "diagnóstico confiable" de los materiales.

## 1.5 BIBLIOGRAFIA

1. Gavaldón A. Ing. (1979)  
PROCESOS DE MANUFACTURA  
Universidad Iberoamericana - México

2. Ishikawa Kaoru (1986)  
QUE ES CONTROL TOTAL DE CALIDAD  
Editorial Norma - Colombia
3. Gilardoni A. (1981)  
HANDBOOK OF NON DESTRUCTIVE EVALUATION  
Steffanoni Lecco - Italy
4. American Society for Metals (1976)  
METALS HANDBOOK VOL.11 N.D.E.  
A.S.M. - U.S.A.
5. Rescalvo J.A. (1984)  
PLAN INTEGRAL DE INSPECCION DE CENTRALES  
Grupo CIAT, Seminario Técnico - México
6. Stout D. R. (1971)  
WELDEABILITY OF STEELS  
Welding Research Council - U.S.A.
7. Munse W.H. (1964)  
FATIGUE OF WELDED STEEL STRUCTURES  
Welding Research Council - U.S.A.
8. American Society of Mechanical Engineers (1983)  
CODE FOR BOILERS AND PRESSURE VESSELS  
SECC. V NONDESTRUCTIVE EXAMINATION  
A.S.M.E. - U.S.A.
9. British Standard Institution (1980)  
GUID. ON SOME METHODS FOR THE DERIVATION OF ACCEP  
TANCE LEVELS FOR DEFECTS IN FUSION WELDED JOINTS  
B.S. PD 6493:1980 U. K.
10. American Petroleum Institute  
STANDARD FOR WELDING PIPELINES AND RELATED FACILI-  
TIES  
A.P.I. Standard 1104, May 1983. USA.
11. The Japanese Society for Nondestructive  
Inspection (1983)  
1.- NDT STAUUS AND GENERAL PRINCIPLES  
3.- PRESENT SATUS OF ULTRASONIC TESTING  
J.S.N.I. - Japan.
12. Hernandez Hector L.  
LA IMPORTANCIA DE LA MECANICA DE FRACTURA EN LA FA-  
SE DE DISERO Y SUS FUNDAMENTOS TEORICOS  
XII Congreso Nacional Bienal del CIME, Nov. 4-7  
1986, México.
13. Calva V. Mauricio (1985)  
INFORME SOBRE LA INSPECCION DE CENTRALES GENERADO-  
RAS DE ENERGIA ELECTRICA  
Informe IIE/12/1815/I 05/p

14. Calva V. Mauricio (1987)  
DETECCION Y MONITOREO DE CORROSION POR MEDIO DE UL-  
TRASONIDO EN LOS GENERADORES DE VAPOR  
Boletin IIE Nov-Dic 1987 pp 244-254.

## CAPITULO 2. METODOS DE EVALUACION NO DESTRUCTIVA

### 2.1 INTRODUCCION

La evaluación de materiales utilizando métodos que no afecten sus características es la única forma de asegurar que todos los componentes cumplen con los requerimientos mínimos de calidad necesarios para desarrollar la tarea para la que fueron diseñados, y que dicho objeto puede ser integrado ó reintegrado a servicio.

De acuerdo con los criterios actuales sobre Control Total de Calidad es deseable evaluar todas las piezas que van a prestar servicio, y de esa forma considerar los criterios de la Ingeniería de Evaluación Crítica para determinar la vida residual de los materiales en las condiciones reales de operación.

Las tendencias actuales están basadas en los modelos de Mecánica de Fracturas para determinar si una discontinuidad debe ser considerada "grave" ó no, y la información sobre la posición, dimensiones y geometría de las discontinuidades.

Las técnicas que son capaces de ofrecer la información necesaria para realizar este tipo de evaluaciones se conocen bajo el nombre colectivo de "Pruebas ó Ensayos no Destructivos" y deben cumplir una serie de requisitos para ser definidas como tales, como son:

- 1) ser capaces de detectar la presencia de las propiedades ó características que nos permitan evaluar el material ó pieza bajo estudio. Mientras mayor información obtengamos de ella, mayor será el beneficio.
- 2) el método seleccionado no debe modificar la condición inicial del material; es decir, no debe beneficiar la aparición ó propagación de discontinuidades ó la alteración de alguna de las propiedades del material.
- 3) deben ser, en lo posible, aplicables en la posición, ensamble y ambiente de la pieza con el fin de no interferir en el proceso de manufactura ó ensamble subsecuente; ó incidir en costos de preparación, desmontaje, ensamble, etc.

De esta forma estaremos seguros que nuestro método es lo más confiable y económico posible.

Históricamente [1], los primeros métodos que se utilizaron para verificar la "calidad" de los artículos fueron los acústicos, en los cuales se aplicaba un ligero golpe a las forjas y fundiciones; las características sonoras eran comparadas con las que producían otras piezas. Sin embargo, la confiabilidad de la prueba no era muy alta, ya que permitía aceptar piezas defectuosas y rechazar piezas que sí podían haber dado servicio.

Posteriormente, en la elaboración de piezas más precisas, la metrología apareció como un control esencial y ha seguido hasta ahora como el método de control de calidad más utilizado en la industria.

Durante la elaboración de los primeros laminados para la construcción de tanques, vías y viguetas se utilizaba un método que es el precursor de los líquidos penetrantes actuales. En este procedimiento se aplicaba una capa de kerozeno en la superficie de las piezas y, después de una limpieza, se golpeaba la pieza para ver si aparecían nuevas manchas sobre la superficie. En caso afirmativo, estarían relacionadas con fisuras ó porosidad abierta a la superficie.

Posteriormente, los métodos magnéticos fueron descubiertos y aplicados en forma similar a la actual.

No fue sino hasta el primer cuarto de este siglo que los rayos "x" fueron utilizados para la inspección de materiales y más tarde, durante la década de los cuarenta, se utilizó por primera vez el ultrasonido.

## 2.2 INSPECCION VISUAL

La técnica de inspección visual implica el desarrollo de la habilidad de los inspectores para detectar ó inferir de sus observaciones, desperfectos ó discontinuidades en los materiales ó equipos. [1,2]. La técnica se vale de instrumentos como boroscopios, microscopios, lupas y cámaras de televisión miniatura, que nos permiten aumentar el alcance de nuestros sentidos naturales.

Actualmente se utilizan otras herramientas, como la cámara de detección de radiación infrarroja y los procesos de comparación digital de patrones gráficos, las cámaras miniatura de tv, sistemas laser para dimensionamiento, que han abierto nuevos campos de desarrollo en esta técnica.

Aunque este método es en principio bastante limitado, debe dársele la importancia que merece; de su correcta aplicación depende muchas veces la eficiencia y el éxito de todo el servicio de inspección.

## 2.3 TECNICAS SUPERFICIALES

Dentro de las técnicas convencionales para la detección de defectos superficiales encontramos la técnica de Líquidos Penetrantes (PT) y la técnica de Partículas Magnéticas (MPI).

La inspección de defectos superficiales con líquidos penetrantes está basado en la capacidad que tienen ciertas sustancias para penetrar en pequeñas aberturas de la superficie. [1,2,4].

Esta técnica nos permite conocer la presencia de imperfecciones que estén abiertas a la superficie. Mientras mayor sea su volumen, mayor probabilidad existe de ser detectada; aunque los defectos con propiedades capilares son más fácilmente detectados que los volumétricos. (ver Figura 1).

Puede aplicarse en cualquier material que no sea poroso y que no presente irregularidades en la superficie que puedan dar lugar a indicaciones falsas.

A pesar de su bajo costo, normalmente se utiliza sólo en piezas nuevas ó en superficies con acabado fino. No por la simplicidad del método debe menospreciarse y dejarse en manos inexpertas. El inspector debe conocer los conceptos básicos y ser capaz de reconocer las indicaciones relevantes. Debe poder aplicar los criterios de aceptación/rechazo, y referirse a los códigos aplicables en su caso.

De acuerdo con los criterios establecidos en el capítulo anterior sobre los modelos basados en Mecánica de Fracturas para la evaluación de la vida residual de los materiales, esta técnica nos brinda realmente poca información, en especial por su gran limitación para la detección volumétrica.

En la Técnica de Partículas Magnéticas, se aplica un flujo magnético en un material, de tal forma que, en caso de existir alguna imperfección sobre la superficie ó cerca de ella, las líneas del campo serán modificadas; esta alteración en su comportamiento es lo que permite detectarlas y evaluarlas. [1,2,3,4]. (ver figura 2).

En la actualidad existen varios métodos para detectar estas alteraciones del flujo, como son partículas ferromagnéticas coloreadas y fluorescentes (de donde esta técnica toma su nombre), bobinas miniatura y puntas de efecto Hall, que permiten detectarse si ha habido una fuga de flujo magnético en la superficie. Esta técnica debe considerarse al igual que las anteriores como puramente cualitativa.

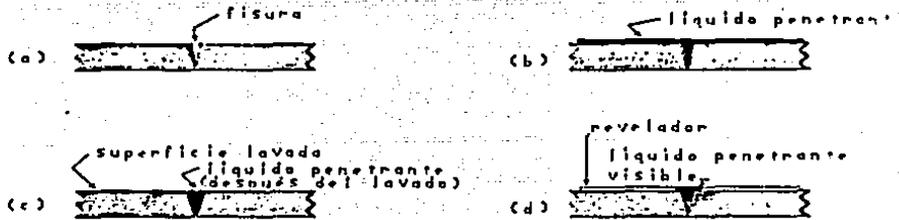
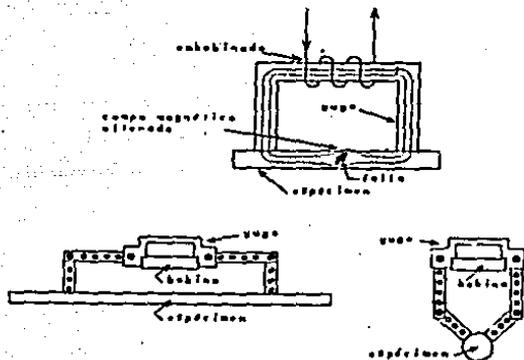


Figura 1. La técnica con Líquidos Penetrantes.  
 La prueba se realiza en 4 pasos:  
 a) Limpieza previa  
 b) Aplicación de la tinta penetrante  
 c) Limpieza de exceso de líquido  
 d) Aplicación del revelador.



Yugo para realizar pruebas magnéticas.

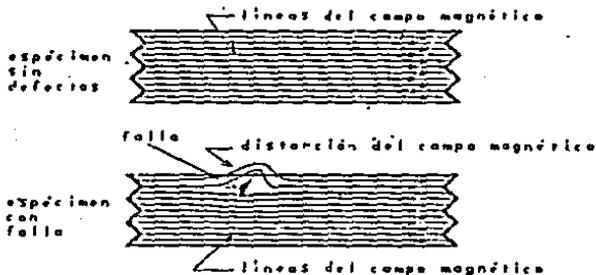


Figura 2. Técnica Magnética de Inspección

En la parte superior se muestra el uso del Yugo magnético y su principio de operación. En la parte inferior se muestra la distorsión de las líneas de campo magnético en una falla.

La técnica de Partículas Magnéticas se puede aplicar eficientemente sólo en materiales ferromagnéticos que no presenten grandes irregularidades ó suciedad en la superficie, pero en estos materiales permite la evaluación de grandes áreas en un tiempo relativamente corto, lo que lo hace atractivo en inspección de servicio donde se requiere evaluar grandes superficies sin demasiada preparación.

Existe una serie de normas y procedimientos para la aplicación de esta técnica en donde se establecen los criterios de aceptación y rechazo y prácticas específicas de uso.

Al igual que los Líquidos penetrantes, los métodos magnéticos no proporcionan la información adecuada para ser aplicados en los modelos de Ingeniería de Evaluación Crítica.

#### 2.4 CORRIENTES INDUCIDAS

La técnica de evaluación por Corrientes Inducidas, también conocida como Corrientes Eddy, aprovecha los cambios que se producen en una bobina al haber modificaciones del campo magnético generado por corrientes inducidas en un material. [1,2,4].

De esta forma, la técnica es capaz de mostrar cambios en el material de casi cualquier índole; por ejemplo: cambios en la composición química del material, en su microestructura, en la dureza superficial, en las dimensiones físicas, en su posición relativa, en su espesor, y a discontinuidades como figuras, poros, inclusiones, etc. A pesar de ser el aspecto más atractivo del método, es también la principal de sus limitaciones.

Por ejemplo en la Figura 2, se muestra un tubo de un intercambiador de calor que está siendo inspeccionado con la técnica de Corrientes Inducidas, usando una punta de pruebas que va por su interior. En la parte inferior de la Figura se muestran los resultados obtenidos con esta técnica.

Si generamos una señal de corriente alterna y la hacemos circular por una bobina, ésta producirá el mismo tipo de corrientes en los materiales metálicos que se encuentren cercanos a ella. Dichas corrientes sin embargo, se verán modificadas por casi cualquier propiedad del material, de tal forma que el campo magnético que a su vez estas corrientes inducen, tendrán en lo general Amplitud y Fase distinta a la señal originalmente aplicada.

Esta diferencia de Amplitud y Fase se puede representar en un plano de impedancia con la Resistencia Pura y la Reactancia Inductiva como ejes, en los que es fácilmente observable el cambio en conductividad y en permeabilidad magnética del material.

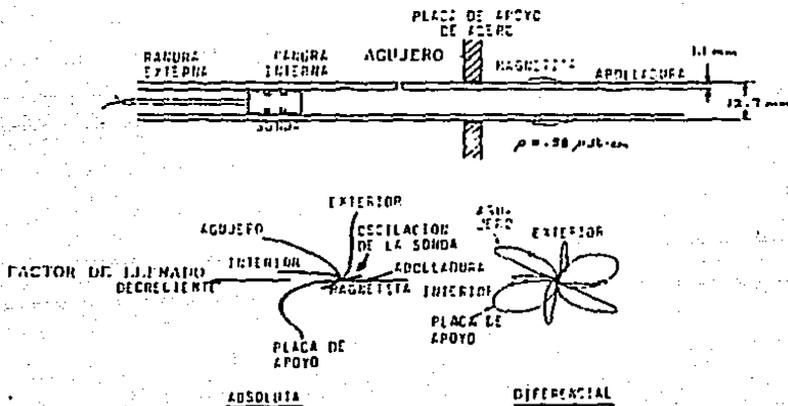


Figura 3. Técnica de Corrientes Inducidas

Se muestra un ejemplo del uso de esta técnica en un tubo de intercambiador de calor. En la parte inferior se muestran los resultados de la prueba usando tanto una punta absoluta como una diferencial.

La información que se despliega en este plano al momento de desplazar la punta de prueba sobre el material, es la que debe ser interpretada para decidir, primero, si existe ó no diferencia en el material y, segundo, cuál es esa diferencia.

Precisamente la gran cantidad de información contenida en ese plano hace casi imposible reconocer los efectos de cada una de las propiedades. Afortunadamente, en la mayoría de los casos, son sólo una ó dos las variables que nos interesan, y podemos considerar que las demás permanecen constantes.

Los diseñadores de procedimientos con corrientes inducidas convencionales, establecen sistemas de medición que permiten medir cambios de corriente muy pequeños en las bobinas.

Las variables del método son también muy limitadas, siendo las más importantes la frecuencia de la prueba y la geometría, propiedades magnéticas y arreglo físico de las bobinas.

Debido a sus características, este método está limitado a materiales metálicos y sólo puede evaluar propiedades superficiales y algunas veces subsuperficiales.

A causa de los efectos de histéresis en materiales con propiedades magnéticas, es necesario aplicar un campo de saturación para poder revelar las características que nos interesan.

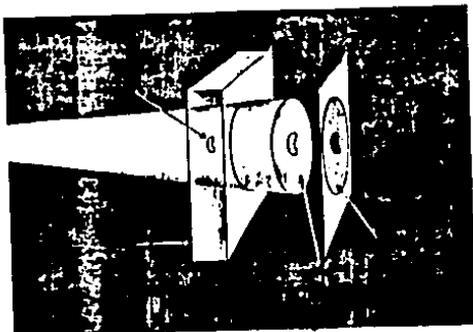
Considerando todo lo anterior, podemos concluir, que si bien este procedimiento de inspección permite la identificación de una gran cantidad de propiedades de los materiales metálicos, requiere de análisis básicos y de desarrollo tecnológico para poder utilizarse con mayor eficiencia y confiabilidad.

Las limitaciones de esta técnica residen en su incapacidad para caracterizar completamente una discontinuidad, lo que la hace inoperante en los modelos de evaluación de Vida Residual discutidos en el capítulo anterior.

## 2.6 RADIOGRAFIA

En la técnica radiográfica se aprovecha la capacidad que tiene la radiación de alta energía para atravesar los materiales, y la dependencia la atenuación de la intensidad transmitida con las características del material. Esta información es detectada normalmente en películas sensibles a la radiación ó en otros casos por dispositivos de estado sólido que realizan esta captura. [1,2,3,4,8,13].

Por lo general, se utilizan equipos generadores de rayos "x" con energías de 100 Kev hasta varios MeV con corrientes de algunos miliamperes ó fuentes radioactivas como cobalto 60, iridio 192 ó cesio 137. En el caso de acero con equipos convencionales solo es posible inspeccionar espesores meno-



**Figura 4. Formación de la Imagen Radiográfica**  
El Haz de radiación atraviesa el material, en caso de existir alguna discontinuidad habrá una modificación en la atenuación de la intensidad transmitida, lo que provoca la formación de la imagen en una película sensible a esta radiación.

res de 1 1/2 pulgadas.

Con este método se buscan alteraciones en la calidad de material, generalmente inclusiones de diversos tipos, desgarras, fisuras, defectos superficiales y defectos de geometría; en los métodos convencionales se estima que es posible detectar defectos con dimensiones equivalentes al 2% del espesor del material en el sentido paralelo a la incidencia y 4% en direcciones perpendiculares a ella, permitiendo la detección de defectos en todo el volumen del material. (ver Figura 4).

Una serie de factores determinan los parámetros de la prueba, siendo principalmente la composición del material, su espesor, tiempo de exposición, y energía e intensidad de la radiación. Por otra parte los resultados del método son afectadas por otras consideraciones, como el proceso de revelado, y las condiciones geométricas de la prueba.

Para controlar la calidad del procedimiento se utiliza un dispositivo denominado Indicador de Calidad, que esta normalizado por los códigos que estamos aplicando. Normalmente se trata de láminas con 2% del espesor de la placa inspeccionada, con una serie de orificios, ó un arreglo de alambres de distinto diámetro. El proceso de radiografía se considerará aceptable cuando la parte ó partes del Indicador de Calidad designadas en la norma aparezcan claramente en la placa radiográfica.

Estas mismas normas hacen referencia a los criterios que deben establecerse para la aceptación ó rechazo de la pieza basados en las discontinuidades observadas en la placa.

La técnica radiográfica permite obtener un registro gráfico, de relativamente fácil interpretación de la condición interna del material, lo que la ha hecho muy popular en los servicios de inspección no destructiva cuando sus limitaciones, especialmente el espesor por inspeccionar, lo permiten.

Esta técnica nos dá información más ó menos "clara" sobre la localización, dimensiones y geometría de la discontinuidad detectada, lo que -considerando sus limitaciones- la hace aplicable en nuestros modelos de evaluación de Tamaño Crítico de Fisura discutidos anteriormente; por lo tanto podemos utilizar esta metodología para validar las teorías de propagación de fisura y evaluación de la vida residual de los materiales.

## 2.6 METODOS ACUSTICOS

Dentro de los métodos acústicos de inspección, se encuentran principalmente el de emisión acústica y ultrasonicos, en los que se aprovechan las propiedades elásticas de los materiales para obtener información sobre su condición interna. [1,2,3,4,5,6,9,10,11,12].

La técnica de emisión acústica obtiene información del material ó de su comportamiento mecánico aprovechando la ocurrencia "natural" de formas de energía elástica, que es liberada durante la operación normal del equipo, ó durante la aplicación de ensayos que pretenden reproducir esas condiciones.

Es importante hacer notar que se requiere una selección precisa de los parámetros de prueba, con el fin de que nuestro método nos deje observar aquel ó aquellas indicaciones ó detalles en los que estamos interesados, sin interferir con otros que nos dificultan ó entorpecen la evaluación.

Las técnicas de emisión acústica están orientadas al monitoreo de secciones críticas donde un cambio en la cantidad, frecuencia ó forma de las señales liberadas está relacionado con alguna imperfección en la que estemos interesados. En general, los equipos están formados por uno ó varios transductores, un amplificador y un sistema de captura, proceso y presentación gráfica.

Por lo general se selecciona la banda de frecuencia y se hace un estudio del número de "eventos" acústicos que ocurren durante un determinado período de tiempo. Un análisis estadístico de este comportamiento permite correlacionarlo con situaciones específicas en nuestro material ó equipo bajo prueba.

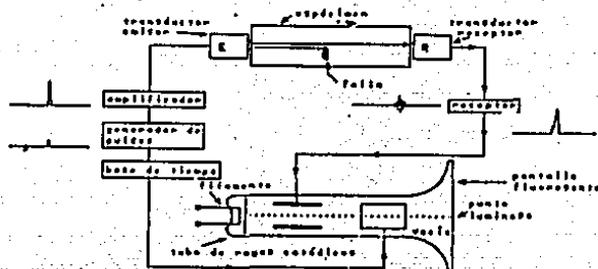
En el estudio de materiales compuestos, detección de propagación de grietas ó monitoreo de eventos de falla, ha demostrado ser un procedimiento valioso, pero que, requiere de un gran cuidado para hacer la calibración y establecer los criterios de alarma y conteo, así como para determinar algunos detalles finos del evento ocurrido.

Los niveles de confiabilidad que se pueden alcanzar con esta prueba no son todavía muy altos, quizá se requiere mayor cuidado en el análisis de las señales y mejores métodos de correlación y discriminación con los eventos reales.

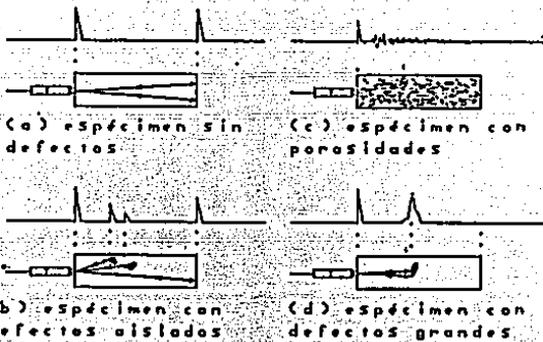
En el caso de la prueba ultrasónica se requiere de una fuente externa de energía acústica que al interactuar con el material, nos permite reconocer la condición interna en la que se encuentra.

En la técnica ultrasónica se utiliza generalmente uno ó varios transductores piezoeléctricos que son excitados para generar y recibir señales acústicas de alta frecuencia, generalmente de orden de 1 a 15 MHz, y un sistema de amplificación y despliegue en una pantalla de rayos catódicos de la información en coordenadas de tiempo-vs-amplitud. Al interactuar la señal incidente con el material, es capaz de revelarnos algunas de sus propiedades.

En este método se puede aprovechar tanto la capacidad de transmisión como de reflexión del sonido, que a su vez dependen completamente de un factor conocido como "impedancia acústica" que, de hecho, representa la proporción de energía transmitida y reflejada en las interfases. Por otra parte,



Equipo convencional de ultrasonido.



Método de pulso - eco.

**Figura 5. Evaluación Ultrasonica de Materiales.** En la parte superior se muestra el diagrama de bloques del equipo convencional. En la parte inferior se muestran algunos resultados obtenidos con el Método pulso-eco en diferentes condiciones.

pueden aprovecharse también los efectos dispersivos que ocurren en el interior, y las propiedades ondulatorias como difracción ó interferencia. Debemos recordar que la señal ultrasónica convencional es fuertemente monocromática y "coherente", lo que puede ayudarnos a explotar sus capacidades.

En la técnica convencional, se envía un "paquete" acústico muy corto que viaja en el interior, y cuando refleja en alguna interface, puede ser detectado y puede evaluarse el tiempo que ha empleado en realizar su viaje. Considerando la velocidad de propagación del sonido como una constante, se puede determinar la "profundidad" a la que ocurrió el efecto. A esta presentación se le conoce como "presentación tipo A". (ver Figura 5).

Como veremos posteriormente en los sólidos se pueden encontrar 2 modos naturales de vibración en el volumen llamados "longitudinal" y "transversal", que tienen que ver con la forma en la que se mueven las partículas del material con respecto a la dirección de propagación del haz, y que poseen diferentes velocidades de propagación y por lo tanto diferente longitud de onda para una misma frecuencia. Además, existe un modo de vibración superficial conocido como ondas tipo Rayleigh y otro conocido como tipo Lamb que se presentan en las láminas.

Además, las características de conversión de modo de vibración durante la reflexión y la refracción, producen condiciones muy peculiares a esta prueba; generalmente, estas señales convertidas interfieren con la interpretación de los resultados, siendo mas grave en piezas con geometría no regular.

La técnica ultrasónica tiene dos modalidades: la de contacto y la de inmersión, que dependen de como se haga el acoplamiento acústico entre el transductor y la pieza a evaluar, aunque ofreciendo la segunda mejores resultados siempre ha estado limitada a sistemas automáticos de laboratorio, sin embargo ahora se ha estado utilizando en campo una variante denominada acoplamiento por columna de agua.

Dependiendo de la geometría de la pieza, de la microestructura del material, del tipo, orientación y localización de los defectos que se están buscando, es como se definen las variables que intervienen en la prueba.

Las variables más importantes en la técnica convencional son:

- 1.- Frecuencia; la selección de la frecuencia establece un compromiso entre la profundidad de la detección y el tamaño mínimo de defecto detectable. La primera de ellas controlado por los fenómenos dispersivos y la segunda por las limitaciones ondulatorias de resolución. Además afecta también la geometría de dispersión del haz acústico, las dimensiones de la zona muerta de detección, las dimensiones máximas del cristal y, la capacidad mínima de detección en frecuencia del sistema electrónico.

2.- Diámetro y número de cristales; del diámetro depende la geometría del haz dispersado, y las dimensiones de la zona muerta. Además de su elección depende la capacidad de detección del sistema, la velocidad de inspección, y la fragilidad mecánica del transductor. Por otro lado normalmente se usan uno ó dos cristales que efectúan las tareas de transmisión-recepción del sonido.

3.- Modo de vibración y ángulo del eje de propagación; la selección del ángulo de propagación depende fundamentalmente de las consideraciones geométricas, se busca la menor interacción posible de la pieza con la interpretación de los resultados. Normalmente se construyen transductores de onda longitudinal para ángulos de incidencia perpendicular es decir a 0 grados, y transductores que generan ondas transversales en el material, normalmente a 45, 60, 70 grados, e inclusive a 90 grados para generar ondas superficiales.

4.- Acoplante acústico; el acoplante acústico es el medio que se interpone entre el transductor y el material por evaluar. Normalmente por facilidad se escoge "agua" ó "aceites ligeros", sin embargo, su eficiencia como acoplantes es bastante mala debido a las pobres características de impedancia acústica que poseen.

Además de estos cuatro parámetros básicas, existen otra serie de variables que influyen fuertemente el resultado de la prueba y que tienen que ver con el aspecto operativo de la misma. Algunas de ellas son: limpieza de la superficie, distancia y ángulo entre el transductor y la superficie de inspección, calibración del sistema, presencia de una cantidad adecuada de acoplante, etc.

Pero por sobre todas estas variables la de mayor peso y determinación en los resultados de la prueba ultrasónica convencional, es la "capacidad del inspector", para interpretar de manera "confiable" las indicaciones que le aparecen en la pantalla de su equipo.

Esta "limitación humana", es sin lugar a duda la misma limitación de la técnica ultrasónica convencional.

La dependencia de la confiabilidad de la técnica con el inspector es absoluta, y es quizá por esta razón que por muchos años la técnica ultrasónica fue relegada a "ultimo recurso". La "capacitación" del inspector es por lo tanto, muy importante en esta metodología, y es por eso que en todas las normas internacionales de inspección se presta especial atención a ese punto.

En principio la técnica ultrasónica convencional únicamente nos da información sobre la "localización" de los reflectores; es incapaz de determinar las "dimensiones" reales de las discontinuidades y su "geometría".

Considerando todo lo anterior esta metodología convencional no ofrece suficiente información para ser utilizada en los modelos de Ingeniería de Evaluación Crítica; precisamen-

te, veremos como es posible incrementar la capacidad de análisis de nuestro sistema de inspección con tal de que ofrezca la información indispensable.

## 2.7 NUEVAS TENDENCIAS EN LOS METODOS NO DESTRUCTIVOS

A lo largo de todo este capítulo hemos estado mencionado las características más importantes de los métodos de inspección convencional.

La principal dificultad de estas técnicas radica en la falta de "confiabilidad" de los resultados obtenidos; si bien, nos permiten detectar la presencia de discontinuidades siempre es difícil asegurar que no existen más de las detectadas, y que todas las reportadas realmente están ahí.

A excepción de la Radiografía las demás técnicas convencionales no son capaces de ofrecer información sobre las dimensiones reales y la geometría de las discontinuidades lo que las hace inapropiadas para ser utilizadas en los nuevos criterios de evaluación. Mencionaré ahora algunos de las tendencias tecnológicas en las diferentes técnicas que pretenden aumentar la "confiabilidad" y la capacidad de análisis de las pruebas:

En las técnicas de líquidos penetrantes y partículas magnéticas, el desarrollo está orientado a la búsqueda de nuevos materiales; y al uso de sistemas de video para el registro y el procesamiento digital de las imágenes.

En las técnicas radiográficas, el uso de equipos de rayos "X" de alta energía y zonas de enfoque reducida han sido los resultados en los últimos años [8]. Actualmente se están desarrollando detectores de radiación de estado sólido, procesamiento digital de imágenes, y métodos radiográficos de flash. La tendencia parece ser : equipos más poderosos para usarlos con periodos de exposición más corto.

Actualmente gracias a los nuevos recursos de microcomputo y de instrumental, se están estableciendo nuevas tendencias en prácticamente todas las técnicas, principalmente en los métodos Acústicos y los Magnéticos, en los que interviene una señal electrónica.

En especial los METODOS ULTRASONICOS son los que ofrecen una mayor posibilidad de desarrollo y aplicación en la industria, por ejemplo:

Gracias a los nuevos sistemas electrónicos es posible incluir en un equipo portátil una sistema de procesamiento de señales muy sofisticado, [7,9,10,11] de tal forma que es posible resolver casi en tiempo real todas las operaciones para ofrecer al inspector una herramienta de inspección muy poderosa.

El uso de Procesadores Digitales de Señales parece ser

la siguiente alternativa para estos equipos. También se está trabajando en el diseño de transductores piezoeléctricos de banda ancha, transductores electromagnéticos para ultrasonido, dispositivos de enfoque, efectos acústico-ópticos superficiales, y otros muchos temas. [12].

Es en estos momentos, es cuando realmente se puede empezar el desarrollo de las pruebas no destructivas en general y de los METODOS ULTRASONICOS en particular; ya que actualmente se cuenta con las herramientas necesarias, el futuro parece prometedor ya que irá acompañado directamente de los triunfos de la microelectrónica, el procesamiento de señales y el desarrollo de nuevos materiales.

En los siguientes capítulos analizaremos con mayor detalle los métodos ultrasónicos de inspección.

## 2.8 BIBLIOGRAFIA

1. American Society for Non Destructive Testing (1977)  
NONDESTRUCTIVE TESTING HANDBOOK  
A.S.N.T. - U.S.A.
2. American Society for Metals (1976)  
METALS HANDBOOK, VOL 11 N.D.E.  
A.S.M. - U.S.A.
3. Gilardoni A. (1981)  
HANDBOOK OF NONDESTRUCTIVE EVALUATION  
Steffanoni Leeco - Italy
4. The Japanese Society for Nondestructive Inspection  
(1983)
  - 1.- NDT STATUS AND GENERAL PRINCIPLES
  - 2.- PRESENT STATUS OF APPLICATION OF RADIOGRAPHY
  - 3.- PRESENT STATUS OF ULTRASONIC TESTING
  - 4.- GUIDELINE FOR CERTIFICATION SCHEME
 J.S.N.I. - Japan
5. Calva V. Mauricio (1987)  
EVALUACION ULTRASONICA DE MATERIALES  
Reporte IIE/12/2219/I 01/p
6. School of Applied Non-Destructive Testing/ Welding  
Institute  
CONVENTIONAL TECHNIQS COURSE  
S.A.N.D.T./ W.I. - U.K.
7. Electrical Power Research Institute (1986)  
DIGITAL TECHNIQUES TO IMPROVE FLAW DETECTION BY UL-  
TRASOUND SYSTEMS  
EPRI NP-4878 - U.S.A.

8. Electrical Power Research Institute (1987)  
IMPROVEMENT OF A PORTABLE HIGH-ENERGY RADIOGRAPHIC  
INSPECTION SYSTEM  
EPRI NP-4848 - U.S.A.
9. Electrical Power Research Institute (1987)  
COMPARATIVE EVALUATION OF ACOUSTIC HOLOGRAPHY  
SYSTEMS  
EPRI NP-5130 - U.S.A.
10. Calva V. Mauricio (1987)  
APOYO PARA EL DESARROLLO DE TECNICAS AVANZADAS DE  
ULTRASONIDO COMPUTARIZADO  
Reporte IIE/12/2219/I 03/F
11. Calva V. Mauricio, Loske M. Achim  
EXAMENES NO DESTRUCTIVOS  
Boletin IIE, Jul-Ago. 1987 pp 139-151.
12. Silk M. G. (1984)  
ULTRASONIC TRANSDUCERS FOR NONDESTRUCTIVE TESTING  
Adam Hilger Ltd. Bristol U.K.
13. Agfa - Gevaert (1980)  
INDUSTRIAL RADIOGRAPHY  
Publ. Agfa Gevaert N.V. 21.7220(181) Belgium

### CAPITULO 3. MODELOS DE LA PROPAGACION DE LAS ONDAS ULTRASONORAS EN SOLIDOS

#### 3.1 INTRODUCCION

La única forma que existe para tratar de mejorar la capacidad tecnológica de los métodos ultrasónicos de inspección, es profundizar en sus bases para buscar respuestas y alternativas de solución a las actualmente existentes.

Históricamente [2], las teorías de propagación de vibraciones en los sólidos fueron desarrollada desde mediados del siglo pasado, principalmente por Stokes, Poisson, Rayleigh, Kelvin y otros. Estos modelos se obtuvieron como resultados de los problemas de cuerpos vibrantes, y de los esfuerzos realizados por encontrar una teoría que permitiera explicar el comportamiento de la luz, que en aquellos tiempos era considerada como un forma de vibración elástica del eter.

Es hasta mediados de siglo que se retomaron aquellos resultados y se dio un nuevo impulso a estos temas de investigación. Este desarrollo sin duda está asociado con la aparición de métodos que permitieron la generación y detección de ondas ultrasonoras; y con la aparición de nuevos materiales que requirieron de una determinación cuidadosa de sus propiedades elasto-plásticas y de los efectos de las imperfecciones en su interior.

#### 3.2 MODELO ELASTICO DE PROPAGACION ULTRASONICA

Al aplicar una fuerza a un cuerpo rígido se produce una aceleración con respecto a su centro de gravedad.

Sin embargo, en los materiales elásticos al aplicar una fuerza durante un intervalo de tiempo "pequeño" se produce únicamente una deformación en la superficie, la cual iniciará su propagación hacia el interior del material. La forma en que sepropaga esta deformación en el material únicamente depende de las características elásticas del medio.

En la teoría clásica del sonido se estudia que la velocidad de propagación de las ondas elásticas en un fluido está relacionada con su densidad ( $\rho$ ) y su módulo elástico ( $k$ ) en la forma :

$$[1] \quad v = \sqrt{k/\rho}$$

cuando un medio no soporta esfuerzos cortantes, como el caso de los fluidos, este es el único modo de en que las ondas elásticas pueden viajar dentro de él.

En el caso de sólidos elásticos existen dos modos de propagación, uno llamado compresional ó longitudinal y otro llamado cortante ó transversal, en el que la dirección del movimiento de las partículas del medio es perpendicular a la dirección de propagación.

Además de estos modos existe otro tipo de onda que es capaz de viajar sobre la superficie de los sólidos, y que se conoce como ondas de Rayleigh. Estas ondas son importantes por ejemplo en el estudio de los fenómenos sísmicos.

En caso de que el medio no sea elástico, es decir que la relación esfuerzo-deformación haya dejado de ser lineal aparecen otros tipos importantes de propagación de ondas elásticas como las Ondas de Choque y las Ondas Plásticas.

Las ondas de choque aparecen cuando las perturbaciones mayores se propagan con mayor velocidad produciendo un frente abrupto de ondas de presión. Por otra parte las ondas plásticas se producen cuando un medio se comporta como un elástico hasta un determinado esfuerzo después del cual empieza a fluir, lo que genera un segundo frente de ondas que viaja a menor velocidad que las ondas elásticas.

### 3.2.1 Ecuaciones de movimiento de los Medios Elásticos Ondas Longitudinales y Transversales [1,2].

Considerando un punto P con coordenadas  $(x, y, z)$ , contenido en un cubo de material elástico alineado con el sistema ortogonal de referencia y con dimensiones  $dx, dy, dz$ . (ver Figura 1). Podemos decir que el desplazamiento que sufre en el momento de una deformación  $(u, v, w)$  lo colocan en las nuevas coordenadas  $(x+u, y+v, z+w)$  de tal forma que el desplazamiento total pueda ser alguno de estos:

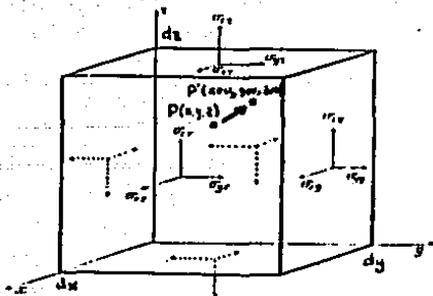


Figura 1. Nomenclatura de las componentes de Esfuerzo actuando en un cubo infinitesimal.

$$\begin{aligned}
 \epsilon_{xx} &= \frac{\partial u}{\partial x} & \epsilon_{yy} &= \frac{\partial v}{\partial y} & \epsilon_{zz} &= \frac{\partial w}{\partial z} & [2] \\
 \epsilon_{yz} &= \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} & \epsilon_{zx} &= \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial u}{\partial x} & \epsilon_{xz} &= \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \\
 2\epsilon_{xy} &= \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} & 2\epsilon_{yx} &= \frac{\partial v}{\partial z} - \frac{\partial v}{\partial x} & 2\epsilon_{yz} &= \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}
 \end{aligned}$$

Podemos descubrir que las primeras tres cantidades  $\epsilon_{xx}$ ,  $\epsilon_{yy}$ , y  $\epsilon_{zz}$  corresponden a desplazamientos infinitesimales paralelos a los ejes, las siguientes tres corresponden a desplazamientos en sentido cortante y las últimas tres no son componentes de deformación del punto P, sino las componentes de rotación del cuerpo rígido.

Aplicando la Ley de Hook, es decir viendo la forma como varía la posición del punto al aplicar un esfuerzo, y escribiendo en términos de las Constantes Elásticas de Lamé ( $\lambda$  y  $\mu$ ), podemos expresar las deformaciones como:

$$\begin{aligned}
 \sigma_{xx} &= \lambda \Delta + 2\mu \epsilon_{xx} & \sigma_{yy} &= \lambda \Delta + \mu \epsilon_{yy} & \sigma_{zz} &= \lambda \Delta + 2\mu \epsilon_{zz} & [3] \\
 \sigma_{yz} &= \mu \epsilon_{yz} & \sigma_{zx} &= \mu \epsilon_{zx} & \sigma_{xy} &= \mu \epsilon_{xy}
 \end{aligned}$$

$$\text{donde : } \Delta = \epsilon_{xx} + \epsilon_{yy} + \epsilon_{zz}$$

Expresando la 2a. ley de Newton, sin considerar las fuerzas másicas, podemos describir el comportamiento elástico del medio a través de las ecuaciones de movimiento, y posteriormente llegar a expresiones de las Funciones de Onda Elásticas.

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = (\lambda + \mu) \frac{\partial \Delta}{\partial x} + \mu \nabla^2 u \quad [4]$$

similarmente para las direcciones v y w :

$$\rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = (\lambda + \mu) \frac{\partial \Delta}{\partial y} + \mu \nabla^2 v \quad [5]$$

$$\rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = (\lambda + \mu) \frac{\partial \Delta}{\partial z} + \mu \nabla^2 w \quad [6]$$

donde el operador  $\nabla^2$  significa:

$$\frac{d^2}{dx^2} + \frac{d^2}{dy^2} + \frac{d^2}{dz^2}$$

De estos resultados podemos obtener fácilmente la ecuación para los dos tipos de ondas elásticas.

Si diferenciamos a (4) con respecto a X, a (5) con respecto a Y, y a (6) con respecto a Z, y luego las sumamos obtenemos:

$$\rho \frac{\partial^2 \Delta}{\partial t^2} = (\lambda + 2\mu) \nabla^2 \Delta \quad \text{equivalente a} \quad \frac{\partial^2 \Delta}{\partial t^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \Delta}{\partial x^2} \quad [7]$$

es decir la velocidad de propagación de la dilatación, D, es:

$$V_D = \left[ \frac{\lambda + 2\mu}{\rho} \right]^{1/2} \quad [8]$$

por otro lado si eliminamos de las ecuaciones (5) y (6) diferenciando la primera con respecto a Z y a la segunda con respecto a Y después restándolas obtenemos:

$$\rho \frac{\partial^2 w_x}{\partial t^2} = \mu \nabla^2 w_x \quad [9]$$

donde  $w_x$  es la rotación alrededor del eje x, según las definiciones (2). Es decir cuando eliminamos la dilatación la parte rotacional se propaga con una velocidad:

$$V_P = (\mu/\rho)^{1/2} \quad [10]$$

Estos dos tipos de ondas que se propagan con velocidades  $V_R$  y  $V_D$  son las que se conocen como ondas TRANSVERSALES y LONGITUDINALES respectivamente.

### 3.1.2 Ondas Superficiales

En un medio isotrópico sin fronteras únicamente se pueden transmitir dos tipos diferentes de ondas; sin embargo si existe una frontera se pueden producir ondas elásticas superficiales.

Estas ondas que son similares a las producidas por la gravedad en la superficie de los líquidos y fueron inicialmente estudiadas por Rayleigh en 1887, demostró que las ondas superficiales decaen rápidamente con la profundidad y que se propagan a una velocidad un poco menor que las ondas internas de tipo transversal.

Es decir que la velocidad de propagación únicamente depende del módulo de Poisson, por lo que debe esperarse un comportamiento poco dispersivo y con poco cambio de forma.

### 3.2.3 Reflexión y Refracción de Ondas Elásticas

Las ondas elásticas longitudinales ó transversales producen cuatro ondas al interactuar con una interface, dos de ellas son reflejadas en el mismo medio y dos más son refractadas en el segundo medio, debido a la conversión de modo de vibración que se produce durante la interacción.

Las condiciones de frontera en la interface deben ser tales que las siguientes cuatro cantidades sean iguales a ambos lados de la interface :

- i) los desplazamientos normales.
- ii) los desplazamientos tangenciales.
- iii) los esfuerzos normales
- iv) los esfuerzos tangenciales.

Existen cinco ondas que van a contribuir con sus desplazamientos en la interface que son: la onda incidente, las dos reflejadas y las dos refractadas.

Considerando la ubicación experimental de forma que las ondas viajan sobre el plano X-Y y que el plano X-Z es la interface, las cuatro condiciones de frontera las podemos expresar así:



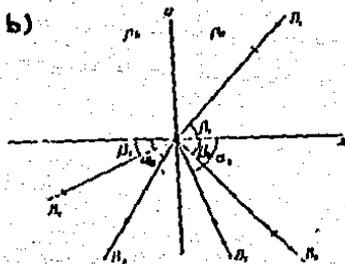
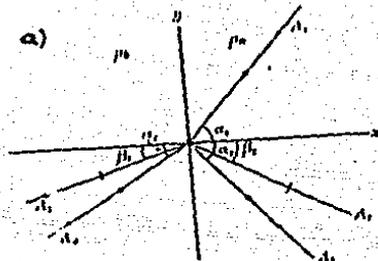


Figura 2. Reflexión y Refracción de ondas elásticas.

En la figura a) se muestra una señal acústica longitudinal ( $\Rightarrow$ ) de amplitud  $A_0$  incidiendo en el plano Y, y se producen 4 nuevas señales en la interfase, una longitudinal ( $\Rightarrow$ ) y una transversal ( $\Leftarrow$ ) a cada lado del plano.

En la figura b) se muestra lo mismo para una señal transversal ( $\Leftarrow$ ) de amplitud  $B_0$ .

te y utilizando la ecuación (13) para obtener expresiones para los valores de las Amplitudes de cada una de las ondas.

Vamos a resolver un ejemplo:

En el caso de una onda longitudinal que incide normalmente al plano, podemos observar que, utilizando la ecuación (13), todos los demás ángulos son CERO. Al substituir este resultado en cada una de las cuatro ecuaciones de frontera obtenemos que A3 y A5 desaparecen y que las soluciones para A2 y A4 son:

$$\begin{aligned} A_2 &= A_1(\rho_b c_3 - \rho_a c_1) / (\rho_b c_3 + \rho_a c_1) \\ A_4 &= A_1 2\rho_a c_1 / (\rho_b c_3 + \rho_a c_1) \end{aligned} \quad [18]$$

Cuando  $\rho_a = \rho_b$  y  $c_1 = c_3$  entonces  $A_2 = 0$  y  $A_4 = A_1$ ; es decir, no hay reflexión en la interfase. Lo cual nos demuestra que el modelo propuesto se comporta de acuerdo a lo observado experimentalmente.

## CASO II INCIDENCIA DE ONDAS TRANSVERSALES

Ahora veremos lo que sucede cuando una onda transversal incide una interfase, en este ejercicio asumiremos la misma nomenclatura del ejemplo anterior, solo que cambiaremos las A por B y las a por b. Es decir, la onda incide con amplitud B1 y a un ángulo b1 sobre el plano X-Y, al interactuar con la interfase en el plano X-Z se producen cuatro nuevas ondas con amplitudes B2 y B3 de la transversal y longitudinal reflejada, y B4 y B5 para la transversal y Longitudinal refractada. ( Ver figura 2.)

En este caso es importante hacer notar que la dirección de vibración de la onda transversal al momento de incidir con la interfase debe ser especificada.

### CASO II.1 ONDA TRANSVERSAL PARALELA AL EJE "Z"

Veremos ahora como al incidir una onda transversal paralela al eje Z "no" se producirá la onda longitudinal correspondiente.

Sea la onda de amplitud B1 la incidente la B2 reflejada y la B5 la refractada con un ángulo dado por:

$$\sin(\beta_3) / \sin(\beta_1) = c_4 / c_2 \quad [19]$$

Para el caso de una onda transversal con movimiento paralelo al eje Z, y refiriéndonos a las condiciones de frontera establecidas al inicio de esta sección (12), podemos decir que únicamente son importantes las segundas partes de las

condiciones ii) y iv).

Resolviendo estas dos condiciones llegamos a:

$$B_1 + B_2 - B_3 = 0 \quad [20]$$

$$\rho_a \cos(2\beta_1) (B_1 - B_2) - \rho_b \cos(2\beta_3) B_3 = 0 \quad [21]$$

En estos resultados observamos que las ondas B3 y B4 han desaparecido, es decir que no se producen ondas longitudinales ni reflejadas ni transmitidas cuando se cumplan estas condiciones.

### CASO II.2 ONDA TRANSVERSAL PERPENDICULAR AL EJE "Z"

Considerando ahora que la onda transversal tiene una orientación perpendicular al eje Z podemos establecer la siguiente relación para los ángulos de las 5 diferentes ondas:

$$\begin{aligned} \sin(\beta_1/c_2) &= \sin(\beta_2/c_2) = \sin(\alpha_2/c_1) \\ &= \sin(\alpha_3/c_1) = \sin(\beta_3/c_1) \end{aligned} \quad [22]$$

En esta condición debemos tomar en cuenta las cuatro condiciones de frontera establecidas previamente, de las que podemos obtener relaciones para las amplitudes de las ondas:

$$(B_1 - B_2) \cos(\beta_1) + B_3 \cos(\alpha_2) + B_1 \cos(\alpha_3) - B_4 \sin(\beta_3) = 0 \quad [23]$$

$$(B_1 + B_2) \cos(\beta_1) + B_3 \sin(\alpha_2) - B_4 \sin(\alpha_3) - B_5 \cos(\beta_3) = 0 \quad [24]$$

$$\begin{aligned} \rho_a c_2 (B_1 + B_2) \sin(2\beta_1) - \rho_b \cos(2\beta_1) B_4 + B_5 + \\ \rho_b c_1 (\rho_a / \rho_b) \cos(2\beta_3) - \rho_a c_1 (\rho_b / \rho_a) \sin(2\beta_3) = 0 \end{aligned} \quad [25]$$

$$\begin{aligned} \rho_a c_2 [(B_1 - B_2) \cos(2\beta_1) - B_3 \cos(\alpha_2) \sin(2\alpha_2)] - \\ \rho_b c_1 [(c_1/c_2) B_3 \sin(2\alpha_3) + B_5 \cos(2\beta_3)] = 0 \end{aligned} \quad [26]$$

Analizando el caso de una incidencia perpendicular, observamos que no se producen ondas longitudinales y se simplifican las ecuaciones a:

$$B_1 + B_2 - B_5 = 0 \quad [27]$$

$$\rho_a c_2 (B_1 - B_2) - \rho_b c_1 B_5 = 0 \quad [28]$$

Cuando la velocidad de propagación en dos medios es la misma entonces no se produce reflexión por lo que  $B_2=0$  y

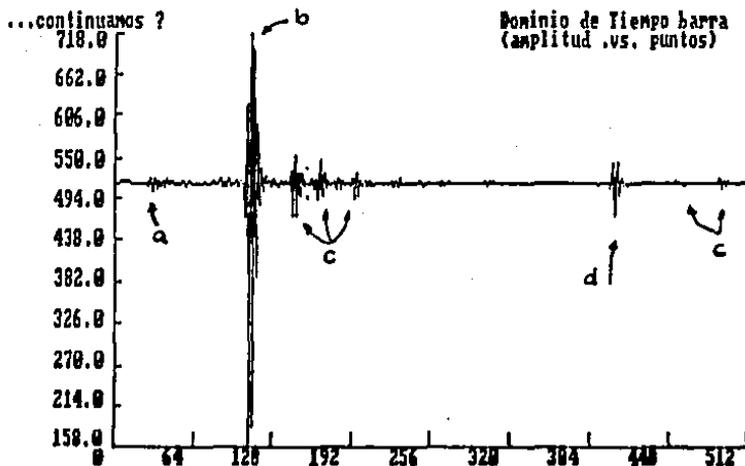


Figura 3. Técnica de Presentación Ultrasonica en modo "A". (Amplitud U.Arb. -vs- Tiempo U. arb.)

- a) Señal de excitación
- b) Señal de eco del barreno a 1/4 de profundidad
- c) Señales espurias provenientes de reflexiones múltiples y cambios de modo
- d) Señal proveniente del fondo del bloque

Cuando sustituimos el valor de  $f_b$  por CERO estamos considerando el caso de una interfase libre, por lo que las ecuaciones obtenidas en la sección anterior pueden ser deducidas de estas. Debe tomarse en cuenta únicamente las cuatro condiciones iii) y iv) y podemos llegar a esos resultados.

### 3.3 METODO ULTRASONICO PULSO-ECO

Los resultados obtenidos en la sección anterior nos permiten hacer un análisis más cuidadoso del comportamiento de las ondas ultrasónicas en el interior de los materiales. Nos da información de los diferentes modos de vibración que existen en los sólidos, de la conversión de modo longitudinal-transversal, y las leyes que gobiernan la reflexión y la refracción acústica.

De esta forma, aprovechando la capacidad de las ondas elásticas ultrasonoras de reflejarse con suficiente amplitud en las interfases, es posible "localizar" discontinuidades midiendo el tiempo de viaje de un paquete acústico compacto, multiplicándolo por la velocidad de propagación. Técnica que se conoce como Pulso-Eco.

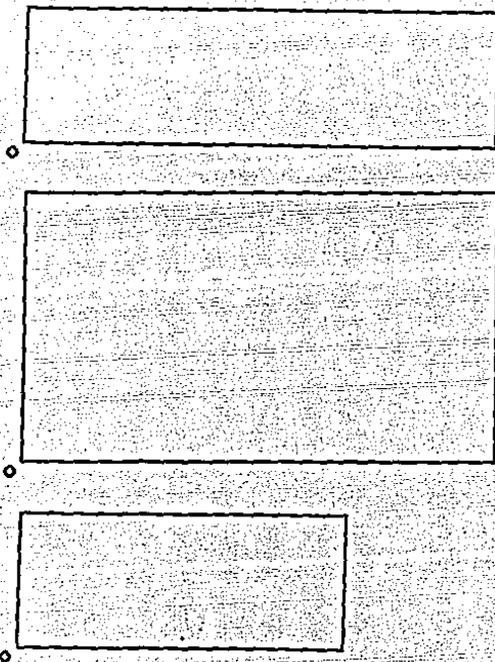
Este tipo de información, que es de hecho unidimensional, se conoce como presentación "TIPO A", denominación derivada de los sistemas de radar que funcionan bajo principios completamente similares. ( Ver rigura 3.)

Las ventajas de la técnica comparativamente a otros métodos de inspección fueron previamente discutidos, sin embargo, sus limitaciones, relacionadas con su confiabilidad por interpretación, han orillado muchas veces a su rechazo.

De hecho, en piezas con geometrías irregulares, con materiales muy dispersivos, ó con alguna otro factor en contra, se requiere de personal técnico áltamente calificado, lo que redundo en la falta de confiabilidad.

Paralelamente al desarrollo de este método unidimensional, se han ido desarrollando sistemas que basados en el mismo principio permiten la visualización bidimensional de las piezas inspeccionadas y de los reflectores presentes en ellas.

A estos procedimientos se les conoce como técnicas de visualización tipo B, D y C, donde las dos primeras son cortes en el espesor del material y la tercera es una vista superior de la pieza. (Ver rigura 4.)



**Figura 4. Técnica de Presentación en modo "B", "C" y "D".**

Estas vistas corresponden a presentaciones hechas individualmente de cada una de las caras del bloque, perteneciendo a la Vista Frontal, Vista de Planta y Vista Lateral respectivamente, ver también la Figura 5.

Estos métodos asocian la posición relativa del transductor sobre la superficie de la pieza con la profundidad de las discontinuidades.

Actualmente gracias a la aparición de los microsistemas de cómputo, es posible ofrecer también vistas Tridimensionales y composiciones isométricas de las piezas. (Ver Figura 5). Con estas técnicas, se ofrece al inspector una herramienta más poderosa para su toma de decisiones, incluso, es posible automatizar el procedimiento.

La composición gráfica de los defectos en el interior de la pieza, permiten apreciar claramente su posición y distribución a lo largo del objeto. Si bien, no se dan mayores detalles sobre la geometría y las dimensiones precisas de los reflectores, la información presentada es de gran ayuda para el inspector.

El sistema desarrollado durante este trabajo, permite hacer presentaciones digitales tipo A,B,C,D, 3-D e ISOMETRICOS; además, gracias a que la información se encuentra en el sistema de cómputo es posible realizar cualquier tipo de manipulación gráfica ó estadística de los resultados, así como cualquier requerimiento de automatización y "toma de decisiones".

En un capítulo posterior se darán detalles sobre la integración del sistema experimental y de los programas de cómputo para la captura, proceso y presentación gráfica de resultados.

Utilizar la información ultrasónica basándose únicamente en el tiempo empleado para el viaje de un tren acústico, significa un desperdicio importante de información contenida en los paquetes producidos durante la interacción con las discontinuidades en el interior del material.

### 3.4 MODELO DE ANALISIS POR DIFRACCION

El método de pulso-eco, si bien aumenta la confiabilidad de la prueba, todavía presenta una serie de dificultades como son por ejemplo, falta de información sobre las dimensiones "reales" del reflector, de su orientación, y de su forma geométrica.

Estas limitaciones se vuelven más importantes cuando, precisamente de la geometría y de las dimensiones de una discontinuidad depende una decisión de calidad. Por ejemplo, no es lo mismo tener porosidad que una fisura ya iniciada en una zona de alto esfuerzo.

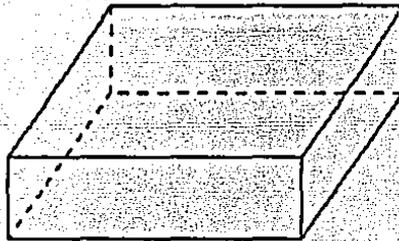
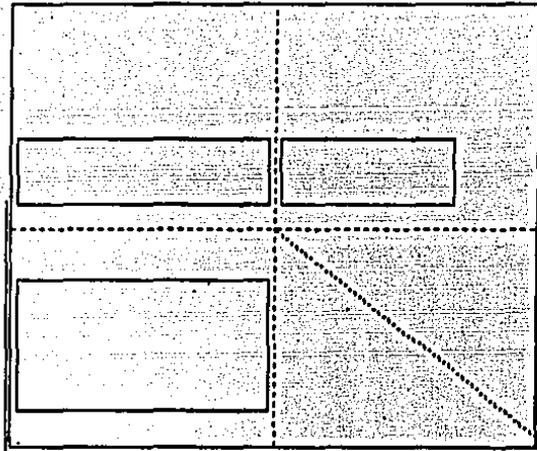


Figura 5. Presentación Isométrica y Tridimensional (3D) del bloque.

De hecho, los criterios de mecánica de fracturas dependen de estas dos características para determinar si una discontinuidad se encuentra por arriba del tamaño crítico, tal como lo discutimos en el primer capítulo de este trabajo.

Hasta el momento se han planteado dos alternativas distintas:

1.) Desarrollar nuevos modelos basándose en el modelo elástico clásico, incluyendo el efecto ondulatorio. Ver por ejemplo a Chapman R.K. (1987) y a Achenbach J.B. (1980). Sin embargo, por el momento, estos modelos son todavía incapaces de ser aplicados en la práctica.

2.) Utilizar modelos ondulatorios generales. Ya que considerando las condiciones experimentales pueden ser aplicados para explicar el comportamiento del ultrasonido. Esta alternativa parece ser la más viable, analizaremos ahora las razones de ello:

Esta segunda alternativa, desarrollada en su mayoría para ondas electromagnéticas en óptica, posee un gran respaldo clásico y a pesar de su formalismo, los resultados tienen una interpretación física normalmente clara. Lo que la hace muy atractiva para analizar los fenómenos ultrasónicos.

Pero, ¿Cual será el límite para la aplicación de los modelos ópticos al ultrasonido? .

Podemos asegurar que la gran diferencia que existe entre estos dos tipos de propagación es la naturaleza de la propagación; en el caso electromagnético, formada por ondas vectoriales eléctricas y magnéticas, y en el caso ultrasónico por ondas elásticas escalares en el caso de propagación longitudinal y ondas elásticas vectoriales para el caso de propagación transversal.

Es decir mientras no incluya el desarrollo ninguna consideración especial sobre el comportamiento eléctrico ó magnético de la onda, y mientras se considere en forma adecuada la naturaleza escalar ó vectorial, consideraremos que el tratamiento de la óptica es aplicable al problema ultrasónico.

Aprovechando los modelos ondulatorios del ultrasonido han surgido dos tendencias tecnológicas para resolver este problema:

1) la primera de ellas utiliza la información de fase contenida en una perturbación ultrasónica continua, de la misma forma en que se utiliza en la holografía y tomografía óptica.

2) la segunda utiliza los criterios de difracción

ondulatoria para analizar los reflectores, usando los principios ópticosf convencionales.

El sistema experimental desarrollado en este trabajo permite el análisis y el desarrollo de ambas tecnologías.

La segunda alternativa es la que nosotros analizaremos con mayor detalle en este trabajo.

Estudiaremos con nuestro sistema la información que se obtiene de la difracción producida por un "tren" acústico al interactuar con una "discontinuidad" de geometría regular.

Esta propuesta es equivalente a la los estudios de difracción en óptica. En cuyo caso utilizan láminas que tienen perforaciones con geometrías conocidas, y se pretende predecir el patrón de difracción producido por ellas.

Para nosotros es conocida la "señal de entrada" y también la "señal difractada"; tratando de relacionar estas dos pretendemos obtener información sobre la geometría de la discontinuidad. ( ver figura 6 ).

### 3.4.1 MODELO DE KIRCHOFF PARA LA DIFRACCION ULTRASONICA

Neubauer (1963), escribió uno de los artículos clásicos sobre difracción por ultrasonido. Las consideraciones que hizo Neubauer para resolver este problema son las mismas que utilizó Kirchoff en su modelo de difracción por reflexión, y que son:

a) Sólomente contribuyen a la formación de la señal difractada los puntos contenidos en la superficie de reflexión.

b) Se considera que existe un plano tangente a la superficie de reflexión y perpendicular a la dirección de la onda incidente.

c) Se establece como condición de frontera la conservación del momento en la interfase, durante la reflexión.

d) Las distancias entre la fuente, el receptor y el objeto siempre serán mucho mayores que la longitud de onda utilizada.

e) La superficie de reflexión debe tener dimensiones comparables con la longitud de onda.

En este trabajo se parte de una solución particular de la ecuación de onda

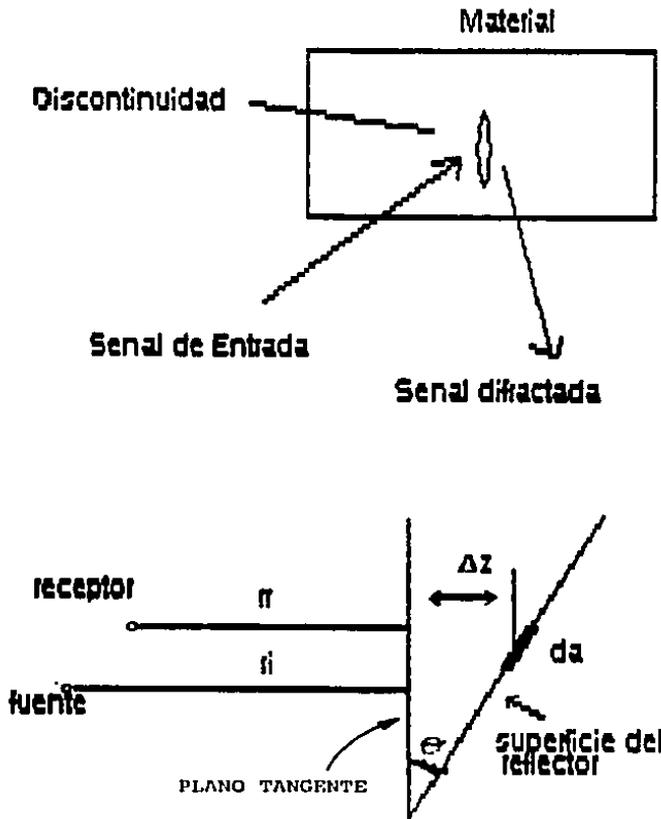


figura 6. Difraccion Ultrasonica

$$h = \frac{A}{r} e^{i\omega(t-r/c)} \quad [29]$$

que de hecho es la solución para el caso particular de la difracción óptica de Fresnel.

$$\text{Con } \omega = 2\pi f \quad \text{y} \quad \lambda = c/f$$

considerando que la distancia entre la fuente ultrasónica y el plano tangente es  $r_1$  (ver figura 6) obtenemos:

$$h_i = a b \exp(-i 2\pi \Delta z/\lambda) \quad [30]$$

donde:  $a = \exp(-i 2\pi r_1/\lambda)$   
 $b = A/r_1 \exp(i 2\pi f t)$   
 $r_1 + z$  es la distancia de la fuente al plano y del plano al reflector.

La velocidad de un "tren" acústico incidente la podríamos expresar como:

$$v_i = -dh/dr_1 = ik h_i (-1 - i(1/2) \pi r_1/\lambda) \quad [31]$$

donde  $k = 2\pi/\lambda$

como  $r_1 \gg \lambda$  entonces:

$$v_i = i k h_i \quad [32]$$

De acuerdo con la condición de frontera, la fuerza que opone la superficie a la reflexión del "tren" acústico es de la misma magnitud y en sentido contrario que la aplicada. Para el caso de la componente normal a la superficie podemos decir que la onda reflejada es:

$$d h_r = - [ i a' k / 2\pi r_r ] h_i \exp(-i 4\pi \Delta z/\lambda) \cos(\theta) da \quad [33]$$

donde  $r_r \gg \Delta z$  y  $r_r \gg \lambda$   
 con:  $a' = \exp(-i 2\pi r_r/\lambda)$   
 es decir,  $a'/r_r$  representa un reflector de calibración, perpendicular al haz incidente y tangente a la superficie reflectora desconocida.

De la ecuación (33) podemos obtener una expresión con la frecuencia ( $f$ ) como variable para la difracción por reflexión de superficies generales (ver a Haines N.F. (1980)).

$$hr(f) = [hcal / \lambda cal] \iint \exp(-i4\pi \cdot zf/c) da$$

donde:

Acal es el area de la superficie de calibración  
la integral sobre la superficie proyectada

hcal es:

$$hcal(f) = Acal (i hi / rr c) \exp (i 2 \pi rr f/c)$$

A la ecuación (34) se le conoce como INTEGRAL DE KIRCHOFF, y de ella podemos expresar la reflexión de cualquier superficie como el producto de una función de calibración (hcal) con una función de frecuencia (F) definida por:

$$F(f) = [1 / Acal] \iint \exp(-i4\pi \cdot zf/c) da \quad [35]$$

La cual representa la "respuesta al impulso" de la superficie reflectora.

Por lo tanto:

$$hr(f) = hcal(f) \cdot F(f) \quad [36]$$

Este resultado es realmente importante, ya que nos permite relacionar el resultado experimental (hr) con funciones fácilmente obtenibles (hcal) y (F). Lo que nos abre las puertas para hacer análisis de los resultados experimentales.

### 3.4.2 DIFRACCION EN SUPERFICIES DE GEOMETRIA REGULAR

Haines (1980) continuó su trabajo analizando los resultados que se deben obtener como "respuesta al impulso" de algunas superficies de geometría regular (cilíndrica, esférica y plana). Lo que ha servido como guía de comparación de los resultados experimentales, como lo veremos en seguida.

De acuerdo con la expresión (34) es indispensable substituir el valor de ( $\Delta z$ ) que represente la geometría de la superficie reflectora.

Haines presenta un análisis cuidadoso de estas superficies y realiza las operaciones necesarias para llegar expresiones en el dominio del tiempo de la "respuesta al impulso" de cada una de ellas.

Los resultados se muestran en las siguientes ecuaciones:

Superficies cilíndricas:

$$f(t) = \frac{(cL)(r-ct/2)}{[r^2 - (r-ct/2)^2]^{1/2}}, \quad 0 < t < 2r/c \quad [37]$$

Superficies esféricas:

$$f(t) = \frac{(r^2 - c^2)(r-ct/2)}{Acal}, \quad 0 < t < 2r/c \quad [38]$$

y superficies planas:

$$f(t) = [c/2 Acal \tan(\theta)] y (ct/2) \quad [39]$$

En las (figura 7) se muestran estas funciones en las que se han sustituido los valores siguientes:

Cilindro :  $r = 1 \text{ mm}$        $L = 50 \text{ mm}$

Esfera :  $r = 4 \text{ mm}$

Plano inclinado : cuadrado 5 mm por lado con inclinación de 30 grados.

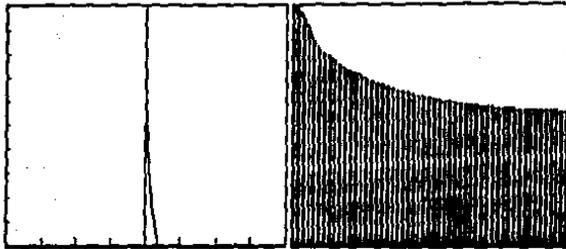
y además se ha tomado el valor de  $Acal = 1 \text{ mm}^2$

Estos valores corresponden a las piezas utilizadas en el desarrollo de este trabajo, y nos permitirán evaluar este modelo en forma experimental.

Con estos resultados ahora somos capaces de establecer un procedimiento para el análisis de las señales obtenidas durante una inspección con ultrasonido.

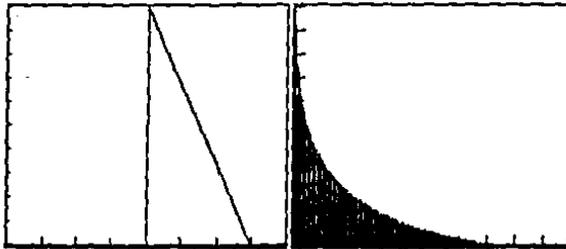
De acuerdo a la ecuación (36) para predecir la geometría de nuestro reflector lo único que debemos hacer es la deconvolución de las funciones  $hr(t)/hcal(t)$ .

Experimentalmente este cálculo se puede realizar obteniendo las funciones de la superficie desconocida y de la superficie de calibración y efectuando la operación.



dominio de tiempo *impes14*

dominio de frecuencia *impes14*



dominio de tiempo *impia30*

dominio de frecuencia *impia30*

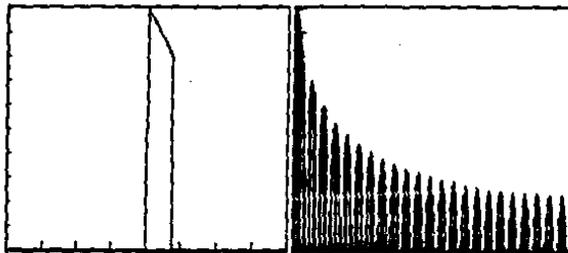


Figura 7. Respuesta al impulso de un cilindro, una esfera y un plano cuadrado inclinado.  
 [Amp. U.Arb -vs-  $t$  14.4 microseg/div]  
 [Amp. 10dB/div -vs- Frec. 1.78 Mhz]

Es decir que lo único que tenemos que hacer es verificar que los resultados obtenidos de la deconvolución coincidan con alguna de las funciones mostradas, de forma tal que podamos determinar la geometría del reflector.

De hecho este análisis coincide con los resultados presentados por Nabel (1978) [6], en donde analiza esta interacción como un sistema lineal. Los resultados obtenidos en este trabajo coinciden con la ecuación (36).

En los siguientes capítulos veremos como podemos analizar este modelo y evaluar su alcance y limitación en las inspecciones ultrasónicas reales.

### 3.5 OTROS RESULTADOS OPTICOS QUE PERMITEN EXPLICAR EL COMPORTAMIENTO ULTRASONICO.

Siguiendo la misma línea de pensamiento expuesta en la sección anterior, utilizaremos ahora algunos otros conceptos de la óptica que nos permiten explicar el comportamiento del ultrasonido en el interior de los materiales.

#### 3.5.1 DIVERGENCIA DEL HAZ ULTRASONICO

La construcción de los transductores piezoeléctricos se realiza utilizando un cristal normalmente de geometría circular, que está soportado en una resina. La excitación del cristal se realiza inyectando un pulso eléctrico entre las dos caras del cristal lo que provoca una "deformación" del cristal de forma que produce "ondas elásticas longitudinales".

Algunos de los aspectos que mayormente cuida el fabricante son: La forma y la duración del "tren" acústico; la frecuencia y el factor de calidad y la impedancia eléctrica.

Podemos considerar al transductor como una membrana circular (en general) de dimensiones finitas que genera ondas planas.

Por lo que de acuerdo a los modelos de difracción óptica está sujeto a los fenómenos de difracción.

Experimentalmente se observa que el haz acústico es divergente y se ha encontrado que esta divergencia es proporcional a la longitud de onda é inversamente proporcional al diámetro del cristal.

Utilizando el calculo de la difracción de Fraunhofer para una abertura de geometría circular encontramos que la forma como diverge el haz de luz está definido por el patrón de Airy, de tal forma que lo que se conoce como el disco de

Airy determina la sección transversal del 84% de la energía luminosa; la expresión que indica la divergencia del disco de Airy es:

(40)

$$\sin(A) = 1.22 \lambda / D$$

donde : A es la mitad del ángulo de divergencia  
 $\lambda$  es longitud de onda  
 D es el diámetro de la abertura

Esta expresión coincide perfectamente con las observaciones experimentales del comportamiento ultrasónico. Y es la que normalmente se usa para calcular la divergencia.

### 3.5.2 LONGITUD DE LA ZONA DE DIFRACCION DE FRESNEL

Los transductores ultrasónicos presentan una zona cercana al cristal en que prácticamente no pueden usarse para la detección ó para la caracterización de discontinuidades. A esta región se le conoce como "zona muerta".

La zona muerta de los transductores está asociada a varios factores como son: la longitud del pulso de excitación en caso de usarse en el modo lanza-recibe; las reflexiones internas en el cristal y la placa de desgaste ó la zapata de inclinación; y la zona de difracción de fresnel.

Esta zona de difracción de Fresnel está caracterizado por cambios abruptos en la presión acústica que provoca un comportamiento poco confiable del transductor. Por esta razón es importante calcular la longitud de esta zona, para evitar "trabajar" dentro de ella.

En la óptica, esta distancia se puede calcular y se obtiene la expresión siguiente:

$$(41) \quad N = D^2 / 4\lambda - \lambda / 4$$

donde: N es la longitud del campo cercano desde el cristal  
 D es el diámetro del cristal  
 $\lambda$  es la longitud de onda.

### 3.6 VISUALIZACION DE DISCONTINUIDADES

Para concluir este capítulo expondremos los modelos y la tecnología asociada a la segunda alternativa para la caracterización de discontinuidades y que se conoce como "visualización" de defectos.

### 3.6.1 Holografía Acústica

Analizando con cuidado la forma como se generan las ondas ultrasónicas en los transductores piezoeléctricos nos damos cuenta que si en lugar de excitarlos con un pulso lo hacemos con una onda continua de frecuencia tal que coincida con su frecuencia central de resonancia obtendremos señales ondulatorias, cuasimonocromáticas, y con un alto grado de coherencia. [11].

Considerando esto podemos intentar aplicar los mismos principios que se usan en la Holografía Óptica, es decir, si enviamos un haz de ondas ultrasónicas continuas a un objeto, y la información recibida de la reflexión la multiplicamos con la señal de referencia de excitación, obtendremos un patrón denominado "holograma acústico". La ventaja de este sistema es que podemos reconstruir la información tridimensional de las discontinuidades en el interior del objeto.

A pesar de ello, presenta también varias desventajas que han impedido su aplicación comercial, como son: las limitaciones de longitud de onda utilizable limitan la capacidad de resolución del sistema; la presencia de ondas generadas por conversión de modos, impiden una reconstrucción clara y; la necesidad de ser utilizada con técnicas de inmersión no permite que sea usada en piezas de grandes dimensiones.

### 3.6.2 Tomografía Acústica

La reconstrucción del interior de los objetos por tomografía acústica está basada en la información obtenida durante el paso de un haz ultrasónico a través del material, de tal forma que se registra la amplitud en la superficie contenida en el plano de corte.

Esta información se procesa como si fuera un arreglo de ecuaciones simultáneas, y se obtiene la amplitud en cada uno de los cruces interiores.

Dependiendo del número de puntos registrados en la circunferencia, va a ser la resolución del sistema.

La principal limitación del sistema es la resolución que depende de la longitud de onda empleada; así mismo, solo puede usarse en objetos con caras paralelas, con acceso a toda la circunferencia en el plano de corte.

### 3.6.3 Reconstrucción por enfoque sintético.

Una alternativa para lograr la reconstrucción del interior de los objetos es utilizar un haz ultrasónico muy esbel-

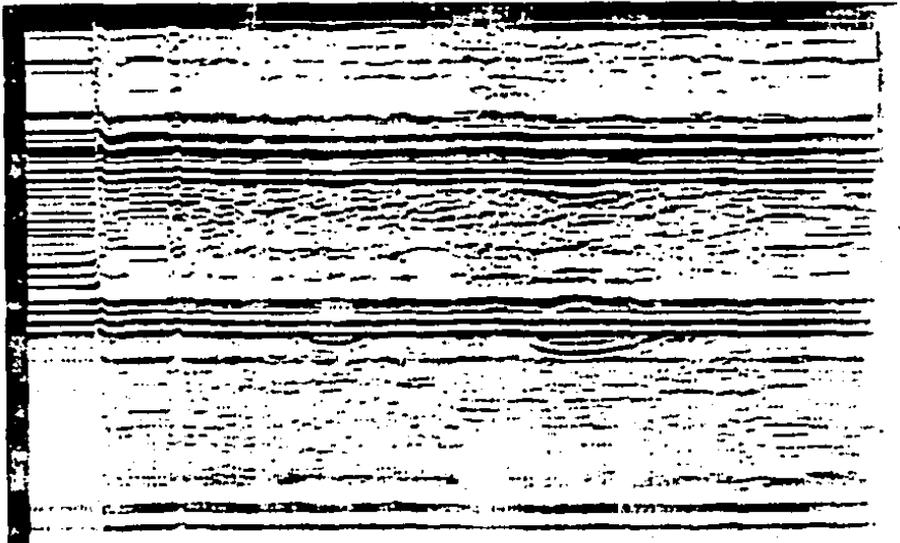


FIGURA 8. TÉCNICA DE VISUALIZACIÓN POR  
TIEMPO DE VUELO "TOP".

to, de tal forma que la reflexión obtenida represente únicamente el material contenido bajo el transductor. De esta forma, efectuando un "barrido" sobre la superficie obtendremos la "imagen" de lo que ocurre en el interior. En cierta forma es equivalente a los procedimientos convencionales de Presentación Gráfica tipo B,C,D, excepto, que en este caso la "resolución lateral" del haz acústico es la que controla la formación de imagen.

El primer intento para lograr esto fue el uso de lentes acústicos, aprovechando las diferentes velocidades de propagación en los materiales. [14] La desventaja de este sistema es que únicamente se puede lograr el enfoque a una profundidad fija. Lo que implicaría el uso de una serie de transductores con diferentes distancias focales para "cubrir" todo el volumen del material.

El uso de "arreglos" de transductores [15] es un intento por modificar la distancia focal en forma electrónica. Esto se logra usando los principios de construcción de Huygens. Estos sistemas son utilizados ampliamente en los equipos ultrasonicos médicos; pero su elevado costo ha impedido que sean utilizados en la industria.

La última alternativa ha sido la reconstrucción sintética de enfoque, [12] en esta técnica se utiliza un transductor con un haz dispersado convencional, se registran todos los modos "A" obtenidos durante el barrido sobre la superficie de inspección.

Una vez que se tiene todo el registro se presentan estos modos "A" en forma ordenada, la presentación se hace en una forma isométrica ó asignando diferentes colores ó tonos de gris a las diferentes amplitudes. Esta técnica de reconstrucción se conoce como TOF (tiempo de vuelo).[13].

Analizando con detalle este resultado, nos damos cuenta que la reflexión de una discontinuidad empieza a aparecer antes de que el transductor este exactamente sobre ella y desaparece una cierta distancia después; este comportamiento depende del ángulo de dispersión del haz y del tiempo empleado para el viaje del tren acústico. Ver figura 8.

Se pueden reconstruir los reflectores usando el modelo de comportamiento discutido. Se han desarrollado varios procedimientos equivalentes como son el SAFT (Tecnología de Enfoque or Apertura Sintética), ALOK (Curvas de seguimiento para enfoque sintético) y algunas variaciones como el LSFT que es una versión bidimensional del SAFT.

Desgraciadamente la gran cantidad de información que es necesario manipular provoca que los tiempos de proceso, aún en computadoras dedicadas sea exagerado, sin embargo los resultados que se han obtenido con este proceso son espectaculares. Ver ( figura 9 ).

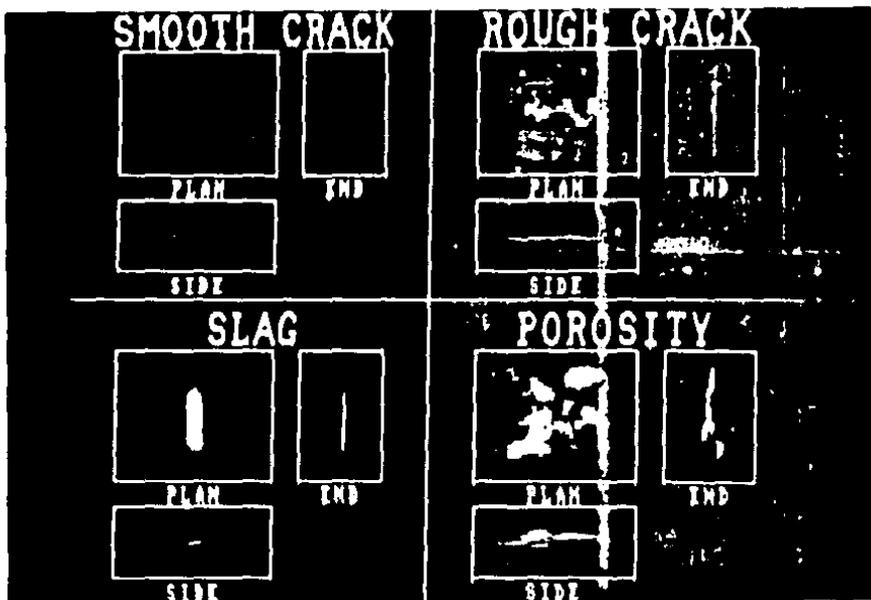


FIGURA 9. USO DE LA TECNOLOGIA DE ENFOQUE POR APERTURA SINTETICA (SAFT) PARA CARACTERIZACION DE RESULTADOS

### 3.6.4 Aplicaciones del Sistema Experimental

Con el sistema experimental desarrollado en este trabajo es posible continuar con la investigación y el desarrollo de nuevas tecnologías para la "caracterización" de discontinuidades en el interior de los materiales.

Las tecnologías de visualización discutidas previamente pueden ser montadas y evaluadas en el sistema, para posteriormente proponer modificaciones ó técnicas alternativas.

Precisamente esta capacidad de crecimiento ha sido el parámetro fundamental para el diseño y la integración de este sistema.

### 3.7 BIBLIOGRAFIA

1. Timoshenko (1968)  
TEORIA DE ELASTICIDAD  
Ed. Urmo - España
2. Holsky H. (1963)  
STRESS WAVES IN SOLIDS  
Dover Publ. - U.S.A.
3. Mase G. E. (1977)  
MECANICA DEL MEDIO CONTINUO  
Mc. Graw-Hill - México
4. Chapman R.K. (1987)  
TEHORETICAL PREDICTIONS AND EXPERIMENTAL VERIFICATION OF TIME-DEPENDENT ULTRASONIC RESPONSES OF SMOOTH DEFECTS  
C.E.G.B. Internal Report - U. K.
5. Achenbach J. D.  
DIFFRACTION OF ELASTIC WAVES BY CRACKS-ANALYTICAL RESULTS  
Elastic Waves and NDT of Materials  
A.S.M.E. AMD. V. 129 - U.S.A.
6. Nabel E. (1978)  
EVALUATION OF ECHOES IN ULTRASONIC TESTING BY DECONVOLUTION  
Materials Evaluation, January

7. Neubauer W.G. (1963)  
A SUMMATION FORMULA FOR USE IN DETERMINING THE REFLECTION FROM IRREGULAR BODIES  
The J. of the Acoust. Soc. of America 35(3)
8. Haines N.F. (1980)  
THE REFLECTION OF ULTRASONIC PULSES FROM SURFACES  
The j. of the Acoust. Soc. of America 67(5)
9. Born M.  
PRINCIPLES OF OPTICS  
Prentice-Hall Publ.
10. Calva V. Mauricio (1987)  
EVALUACION ULTRASONICA DE MATERIALES  
Reporte IIE/12/2219/I 01/p
11. Aldridge E.E. (1970)  
ULTRASONIC HOLOGRAPHY  
Research Techniques in Nondestructive Testing  
Academic Press, London.
12. Schmitz V. and Holler P. (1981)  
RECONSTRUCTION OF DEFECTS BY ULTRASONIC TESTING  
USING SYNTHETIC APERTURE PROCEDURES  
Quantitative N.D.T. Pergamos Press.
13. Collingwood J.C. (1987)  
NUCLEAR NDT DEVELOPMENT AT HARWELL  
NDT International V.20 N.1 February 1987
14. Wustenberg H. Schenke (1982)  
COMPARISON OF THE PERFORMANCE OF PROBES WITH DIFFERENTE FOCUS TECHNOLOGIES AND EXPERIENCES  
I. Mech E. 1982 C157/82
15. Giorcelli C. (1977)  
SONDE FOCALIZATTE ELETTRONICAMENTE  
9o. Congresso C.N.D., Italia.

## CAPITULO 4. DESCRIPCION DEL SISTEMA EXPERIMENTAL

### 4.1. INTRODUCCION

A lo largo de este trabajo hemos analizado las distintas tecnologías que nos permiten evaluar los materiales usando técnicas ultrasónicas, y que son:

1.) Método Pulso-Eco que nos permite localizar las discontinuidades y conocer su distribución dentro del material.

2.) Métodos basados en un análisis más cuidadoso de la información producida durante la interacción de una señal ultrasónica y una discontinuidad. A su vez, discutimos dos alternativas; la primera que usa la información de fase y la segunda que hace una analogía con la difracción óptica.

Después del análisis desarrollado hasta ahora, nos hemos dado cuenta de la gran cantidad de "herramientas" que se requieren para analizar las metodologías propuestas.

Como hemos dicho anteriormente, el principal objetivo de este trabajo es el diseño y la integración de un sistema experimental que permita precisamente hacer estos análisis, y continuar con el desarrollo de la tecnología de evaluación ultrasónica de materiales.

La originalidad de este trabajo radica en el diseño de una metodología para la adquisición y el proceso de la información ultrasónica, que tiene entre otras ventajas una gran capacidad de expansión que permite la evaluación y el desarrollo de nuevas tecnologías ultrasónicas é incluso de Corrientes Inducidas y de Emisión Acústica.

En este capítulo plantharemos el diseño del sistema experimental y posteriormente evaluaremos su capacidad para el análisis de las señales ultrasónicas, y para desarrollar nueva tecnología.

### 4.2 CONFIGURACION DE UN SISTEMA ULTRASONICO

El diseño de un sistema de desarrollo siempre implica un riesgo muy grave, ya que normalmente se desconocen las "capacidades reales de los equipos que existen en el mercado, en especial cuando se habla de equipos de diseño reciente. Muchas veces la información comercial existente es muy vaga y es casi imposible conocer un equipo hasta un cierto tiempo después de estar conviviendo con él.

La única posibilidad de éxito parece radicar en establecer una lista de requerimientos básicos indispensables, y una lista de requerimientos deseables, para poder entonces poner sobre la mesa las necesidades y los recursos disponibles.

Algunos de los conceptos generales más importantes que se deben tener en cuenta al tomar estas decisiones son:

- Compatibilidad con equipos y desarrollo de programación existentes.
- Compatibilidad con desarrollos futuros en instrumentación y programación.
- Capacidad modular de crecimiento en el campo específico y en áreas de intereses afines.

En pocas palabras debe buscarse la mayor versatilidad posible, dentro de los requerimientos básicos indispensables para el desarrollo que nos interesa.

Los requerimientos básicos de la configuración están determinados por las características del sistema y de la señal que queremos analizar. Estas características pueden resumirse en la siguiente forma:

a.- La excitación de los cristales piezoeléctricos se puede realizar utilizando un pulso corto de alto voltaje, una señal continua, un tren de pulsos, una función modulada, etc.

De acuerdo con lo analizado en un trabajo previo [6] hemos descubierto que en el caso de la inspección pulso-eco es más eficiente la excitación utilizando un pulso cuadrado con la frecuencia sintonizada a la frecuencia natural del transductor; de esta forma se logra una mayor transferencia de energía y mucha mayor relación señal/ruido.

Estas consideraciones nos obligan a seleccionar uno ó varios dispositivos que nos permitan generar una gran variedad de señales con el fin de investigar técnicas eficientes para la excitación de transductores.

b.- Como vimos en el capítulo anterior, la velocidad de propagación en el acero es de aproximadamente 6 mm/micro segundo para las ondas longitudinales y la mitad para las ondas transversales; es decir, nuestro sistema de adquisición debe ser capaz de mostrar por lo menos 1 micro segundo por división. Y además, normalmente los transductores piezoeléctricos producen voltajes del orden de milivolts é incluso en algunas ocasiones estaremos interesados en voltajes del orden de microvolts, por lo que será necesario un preamplificador antes de la entrada al osciloscopio.

Por otro lado, debido a que vamos a estar analizando "ventanas" de tiempo que pueden no estar directamente relacionadas con el evento de "disparo", es indispensable contar

con un sistema de "disparo retrasado", para permitir un mejor análisis.

De igual forma, para el análisis de señales es indispensable contar con un "digitalizador" con capacidad suficiente para la captura de señales de hasta 25 MHz; para la transferencia de información a la computadora, y para su proceso. Y a su vez, la inclusión de un sistema "Contador Universal", nos permitiría realizar las labores de análisis, puesta a punto, calibración del sistema en forma más eficiente y simple.

c.- La señal acústica se genera utilizando cristales piezoeléctricos que resuenan en su frecuencia natural. Por lo general, estos cristales están diseñados para producir ondas longitudinales que inciden en el material en forma perpendicular. Esto significa que no se producirán ondas transversales asociadas con la conversión de modo.

En algunas ocasiones, por la disposición geométrica se requiere la incidencia del haz con un cierto ángulo. La forma convencional de lograrlo es inclinando el haz longitudinal de tal forma que aparezca la onda transversal asociada. Si seleccionamos el ángulo de tal forma que la onda longitudinal sea llevada a su ángulo crítico ó mayor, podremos utilizar una onda transversal con un ángulo distinto de CERÓ. Por supuesto, existe también otro ángulo crítico para la componente transversal.

Para una interfase agua/acero los ángulos críticos para la onda longitudinal y transversal son 15 y 27 grados respectivamente, mientras que para una interfase plástico/acero los ángulos son de 27 y 56 grados.

Normalmente se construyen transductores angulares de ondas transversales de 45, 60 y 70 grados. Esta selección depende casi siempre de consideraciones geométricas.

Por otro lado, debido a que la velocidad de propagación de las ondas transversales es aproximadamente la mitad que las longitudinales, su longitud de ondas es también de casi la mitad que las longitudinales. Considerando que el poder de resolución es proporcional a la longitud de onda, las ondas transversales nos ofrecen casi el doble de resolución.

d.- La atenuación de la señal acústica es provocada en su mayor parte por dispersión con los componentes internos. La selección de la frecuencia de operación está normalmente limitada por la pérdida de energía en los materiales.

En general debe establecerse un compromiso entre la capacidad de resolución y y el poder de penetración de la señal acústica. Por ejemplo, en los aceros austeníticos no pueden usarse altas frecuencias, ya que la dispersión por los granos del metal es muy importante. Lo mismo sucede en las fundiciones metálicas, en las cerámicas, en los materiales compuestos, como las fibras reforzadas, y concreto. Para

analizar este tipo de materiales se requiere además de gran energía acústica y de procesos digitales que permitan obtener mejores resultados.

e. La dispersión, además de su efecto en la atenuación, provoca la divergencia del haz acústico, imponiendo limitaciones en cuanto a la resolución lateral del sistema. En el capítulo anterior, tomando en cuenta el primer disco de Airy, obtuvimos que la dispersión es proporcional a la longitud de onda é inversamente proporcional al diámetro del transductor. Para algunas aplicaciones es indispensable aumentar la resolución lateral, ya sea empleando lentes acústicas ó procedimientos de enfoque sintético.

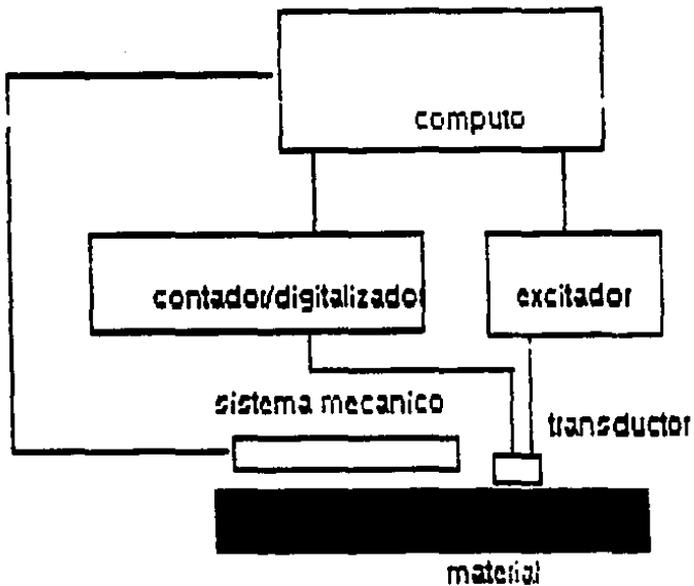
f. Por otro lado, de acuerdo con lo analizado también en el capítulo anterior con respecto a la longitud del Campo Cercano ó de Difracción de Fresnel, descubrimos que ésta es proporcional al cuadrado del diámetro é inversamente proporcional a la longitud de onda. Debido a la irregularidad de la presión acústica en esta zona, no se puede utilizar para la detección ó caracterización de discontinuidades, imponiendo restricciones en cuanto a espesor y detección superficial y subsuperficial en la técnica de contacto.

De las últimas dos consideraciones se obtienen los criterios para la selección adecuada del diámetro del transductor, además de las consideraciones geométricas. En general podemos decir que un diámetro menor produce mayor dispersión pero tiene un campo cercano más corto.

g.- El poder de resolución frontal dependerá de la longitud del tren acústico empleado. Mientras más amortiguado esté, mayor capacidad de resolución tendremos. Sin embargo, no siempre es posible sobreamortiguar el tren, ya que la energía acústica transferida es menor, además de que el comportamiento en frecuencia de los cristales impide la generación de trenes demasiado esbeltos.

h.- La precisión con la que se puede localizar un pulso en el tiempo, depende directamente de la capacidad del sistema instrumental, por lo que es indispensable que el sistema Contador de Intervalos de Tiempo sea lo más preciso posible. Para una longitud de onda de 5 MHz el periodo de la onda será de 5 microsegundos, y su longitud de onda de 1.2 mm para el acero. Es decir, si logramos definir la posición dentro de +/- 500 nanosegundos, la precisión de posición será de +/- 0.12 mm y así sucesivamente.

i.- Para aumentar la repetibilidad del dispositivo de prueba, así como para automatizar la ejecución de las rutinas de inspección de piezas y materiales, es indispensable contar con un dispositivo automático de posicionamiento, que permita ser controlado desde la computadora.



**Figura 1. Diagrama de Bloques del Sistema Experimental**

j.- Como hemos descubierto en el análisis realizado en el capítulo anterior, en todas las técnicas para el procesamiento de señales ultrasónicas interviene una gran cantidad de variables en la instrumentación, por lo que se decidió diseñar un sistema de programación que permita el control de los instrumentos, la adquisición de señales, su procesamiento y la presentación gráfica de los resultados.

De acuerdo con todas estas necesidades, el sistema que integraremos, deberá tener la configuración mostrada en la (figura 1).

A continuación expondremos nuestras decisiones en la selección de equipo y en las especificaciones del sistema de programas de cómputo.

#### 4.3 TRANSDUCTORES PIEZOELECTRICOS Y EXCITACION

Los equipos convencionales de ultrasonido utilizan transductores de tipo piezoeléctrico para convertir la energía eléctrica en mecánica y viceversa.

En la actualidad, existe una gran cantidad de fabricantes y distribuidores de estos transductores.

Los transductores se clasifican de acuerdo con el modo de inspección, que puede ser por contacto, inmersión, simples y duales; por el modo de vibración, por el ángulo de incidencia del haz, por su diámetro, por su frecuencia natural y por la longitud del tren acústico emitido.

Su selección para una aplicación específica depende normalmente de: el grado de accesibilidad y geometría de las superficies; el material y sus características estructurales; el espesor; la condición de la superficie; y la posición y el tipo de discontinuidades buscadas.

Los transductores que seleccionamos para integrar este sistema son:

MARCA/MODELO	TIPO	FREC(MHz)	DIAM(mm)	ANG(grad)	
<b>Krautkramer</b>					
1	gamma	simp/cont.	0.5	25	0
1	gamma	simp/cont.	2.25	25	0
1	alfa	simp/cont.	5	12	0
1	gamma	simp/cont.	5	12	0
1		simp/cont.	2.25	6	45,60,70,90
1		simp/cont.	10	6	45,60,70,90
1		simp/cont.	15	6	45,60,70,90
1	alfa	simp/inme.	5	12	
1	alfa	simp/inme.	5	12	
1	gamma	simp/inme/enf	10	12	enf. 50mm
1	alfa	simp/inme/enf	15	12	enf. 50mm
1	alfa	simp/inme/enf	25	12	enf. 50mm
1		dual/cont.	5	12x10	0, enf.19mm
<b>Gilardoni</b>					
2	DP 25/2	simp/cont.	2	25	0
1	DP 25/4	simp/cont.	4	25	0
2	ATM45/2	simp/cont.	2	10x10	45
1	ATM70/2	simp/cont.	2	10x10	70
1	ATM45/4	simp/cont.	4	10x10	45
1	ATM70/4	simp/cont.	4	10x10	70
1	ATM90/4	simp/cont.	4	10x10	90
2	BDN10/2	simp/inme.	2	10	
1	BDN10/4	simp/inme.	4	10	

Como puede observarse, se ha logrado incluir una gama amplia de transductores que nos aseguran gran versatilidad en el desarrollo de tecnología ultrasónica.

Los equipos comerciales normalmente excitan los transductores con pulsos muy estrechos de gran amplitud, de tal forma que se logra la excitación de toda la variedad de frecuencias con el mismo dispositivo y sin necesidad de modificar nada.

Sin embargo, de acuerdo con lo expuesto en las necesidades del sistema hemos seleccionado dos generadores, que en conjunto son capaces de generar cualquier tipo de señal requerida, tanto en el modo de pulsos, como de trenes y señales continuas, lo que nos permitirá experimentar sobre Métodos para la Excitación Óptima de Transductores, Métodos de Corrección, etc.

HEWLETT PACKARD 8116A, Generador de Pulsos y Funciones  
HEWLETT PACKARD 3421A, Generador de Funciones Arbitrarias

De igual forma, se seleccionó un amplificador de 1000 Watts de potencia y de banda ancha que permite la inspección de materiales sumamente atenuantes, así como hacer desarrollo en técnicas ultrasónicas de alta energía.

RF POWER L. ML1000 Amplificador de 2 a 32 Mhz

#### 4.4 SISTEMA DE ADQUISICION Y MEDICION

El sistema de adquisición es, como lo apuntábamos anteriormente, una de las partes más importantes del sistema. Mientras mayor capacidad de censado y de captura tengamos, más eficiente y versátil será nuestro conjunto, pero como requerimientos mínimos debemos tomar en cuenta el análisis hecho en la sección anterior. Además anotamos también la necesidad de un preamplificador para poder aumentar la capacidad de detección del sistema.

Para los estudios sobre optimización y automatización de métodos convencionales, es necesario contar con una buena capacidad de medición que incluya: medición de intervalos de tiempo entre eventos, colocación de niveles de disparo variables, medición de frecuencias, periodos, fases, etc. y que sean transferibles a una computadora para su análisis tanto en tiempo real como diferido.

Para el desarrollo de los programas experimentales de procesamiento de señales es indispensable contar con un digitalizador de formas de onda, que sean transferibles y procesables en una computadora.

Todos estos requerimientos quedaron cubiertos con el Sistema de Medición con Osciloscopio marca Hewlett-Packard modelo 1980B con opciones 1965A y 19860A. Además este sistema ofrece otras ventajas como disparo con retraso, graficación de pantalla, calibración y pruebas de confiabilidad, entre otras. En resumen, algunas de las características más importantes de este sistema son:

##### HEWLETT PACKARD 1980B/1965A/19860A

###### Sistema de Medición con Osciloscopio

Modo de operación: v-t; 1-2;  
 Amplif. vertical : 100 Mhz, DC, AC, 50 OHMS  
 Bases de tiempo principal y retrasada : 5 ns/div  
 Barrido restrasado: 0-9.999 seg.  
 Disparador: por disparo, auto, fuente interna y externa  
 acoplamiento AC, DC, 50 ohms,  
 Contador de Frecuencia: 100 MHz- 100 Mhz  
 Contador de Periodo : 10 ns-10 S  
 Contador Intervalo de tiempo: +/- 10 ps- =/1 10 S  
 Contador de eventos  
 Ventana de digitalizacion: +/- 4.5 div. , DC- 100 Mhz  
 Resolución vertical : 10 bits  
 Captura de un disparo : 1 s/div- 1 ms/div  
 Captura por repetición: 999 microS/div - 5 ns/div  
 No. max de puntos : 501  
 Promediación en tiempo : hasta 64  
 filtro : 1 Mhz en captura de un disparo  
 cursores: 2

Debemos destacar que este es un instrumento de uso general que no constituye por sí mismo un equipo ultrasónico "convencional", pero que integrado al resto del sistema se convierte en un dispositivo muy poderoso.

#### 4.5 SISTEMA DE COMUNICACION Y DE COMPUTO

Durante los últimos años se ha hecho muy popular una interfase de comunicación y control para instrumentación conocida como la norma IEEE 488. Originalmente, esta interfase fue diseñada en la compañía Hewlett-Packard, y se popularizó con el nombre HP-IB (Hewlett-Packard interfase Bus).

En la actualidad la mayoría de los instrumentos de medición la incluyen. Su gran capacidad para realizar el control y transferencia de información dentro de la red, la gran simplicidad de su protocolo, y la gran versatilidad que en todos sentidos ofrece, son las razones de esta popularidad.

Precisamente, una de las características que requerían los instrumentos y la computadora seleccionados para integrar nuestro sistema, era que contaran con una interfase IEEE-488.

Con respecto a la computadora de control y procesamiento de información, se seleccionó una Microcomputadora IBM Compatible. Esta selección se hizo por la gran versatilidad en cuanto a lenguajes de programación, opciones gráficas, capacidad de expansión en memoria de trabajo, residente y velocidad de proceso.

Actualmente, esta microcomputadora está configurada con un sistema operativo MS-DOS, 640 Kbytes de RAM, 2 unidades de Discos Flexibles, y una unidad de caja de Bernoulli removibles de 10 MBytes cada una como memoria permanente. Además se cuenta con un coprocesador de punto flotante, un "mouse", una pantalla gráfica monocromática de 640x400 pixeles (picture elements).

Además de este sistema se cuenta con una Minicomputadora marca NCR modelo Tower-XP con sistema operativo UNIX y gran capacidad en todos sentidos, y se dispone de los servicios de la Unidad de Cómputo del IIE. Ambos pueden ser accesados a través de la microcomputadora Compatible IBM.

En resumen, las características del dispositivo de proceso son:

CAPITAL EQUIPMENT CO.  
Interfase IEEE-488 para IBM-PC/XT/AT

**OLIVETTI**

Microcomputadora M-24 comp. IBM-XT  
640 Kb RAM  
2 floppys 360 Kb  
1 unidad Bernoulli 10 Mb  
procesador 8088-2  
coprocesador 8087-2  
sist. operativo: MS-DOS

**N.C.R.**

Tower XP  
1 Mb RAM  
2 HD, 25 Mb y 48 Mb  
procesador 68010, 32 bits  
sist. operativo: UNIX

Este sistema se complementa con una serie de periféricos:

HEWLETT-PACKARD	9111A	TABLETA GRAFICA DIGITALIZADORA
HEWLETT-PACKARD	7470A	GRAFICADORA DE 2 PLUMAS
HEWLETT-PACKARD	2602A	IMPRESORA DE MARGARITA
OLIVETTI	PR15B	IMPRESORA MATRICIAL

#### 4.6 SISTEMA AUTOMATICO DE POSICIONAMIENTO

En algunas de las técnicas de inspección de materiales con ultrasonido es indispensable contar con un dispositivo de posicionamiento automático, controlable por computadora.

Durante el presente año concluimos un estudio en el que se diseñó y se construyó un sistema digital para el posicionamiento de transductores ultrasónicos. [8]

Este dispositivo tiene funciones de "escucha" según la norma IEEE-488 y permite el control remoto del número de pasos que debe girar cada motor y la dirección de giro. Asimismo, cuenta con un sistema de "regreso a cero" al inicio de la operación.

Si bien es un sistema limitado, nos permitirá evaluar las técnicas ultrasónicas propuestas en este trabajo; además de habernos brindado una valiosa experiencia para el diseño y construcción de estos dispositivos.

Actualmente estamos diseñando un sistema posicionador que permitirá la inspección de rotores de turbina a través de su barreno axial.

#### 4.7 SISTEMA DE PROGRAMACION

Si es verdad que el Hardware es al Cerebro como el Software es al Pensamiento, el sistema lógico de programación, es la parte medular de todo el dispositivo de análisis.

La idea de establecer una liga entre los instrumentos para poder adquirir y posteriormente procesar y desplegar los resultados, surgió como una necesidad natural. La gran cantidad de información que se genera durante una inspección, el elevado número de posibilidades de tratamiento y procesamiento de la información y las señales generadas, hicieron casi indispensable esta configuración para finalmente ofrecer un despliegue gráfico accesible al investigador que se dedica al desarrollo de tecnología en pruebas no destructivas.

En esta etapa del desarrollo se incluyen rutinas que permiten hacer un análisis cuidadoso de los modelos analizados en el capítulo anterior:

- 1- INSPECCION PULSO-ECO
- 2- CARACTERIZACION POR DIFRACCION

No obstante, esta aplicación no debe tomarse como una limitación pues precisamente una de las principales consideraciones fue el diseño basado en la modularidad con el fin de promover un fácil y rápido crecimiento del sistema.

En este momento se encuentran en desarrollo rutinas para la evaluación de: a) Métodos de tiempo de vuelo TOF; b) Técnicas para el enfoque usando apertura sintética (SAFT); c) Holografía acústica y análisis con señal continua.

Este paquete de programas fue desarrollado en su totalidad en GW-BASIC de Microsoft. La elección de este lenguaje se basó en la orientación de nuestra primera interfase tipo HP-IB que sólo permitía el uso de este lenguaje.

En la actualidad se están reescribiendo los programas en FORTRAN y lenguaje C, y utilizando el GKS (Graphic Kernel System) para las rutinas gráficas. Esta selección se hizo buscando compatibilidad y velocidad de ejecución.

Algunas de las características más importantes del sistema diseñado son:

1. Pantallas enmarcadas, título de pantalla, lista de funciones y renglón de "condición". Con esta configuración se asegura una comprensión clara del sistema, localización dentro de las diversas ramas, y facilidad para seleccionar la función deseada.

2. Captura de carácter. Con esta técnica el usuario únicamente oprime la tecla numérica deseada sin necesidad de dar <return>. Este tipo de captura existe en todos los menús y normalmente está asociada a la condición "...Selecciona".

3. Utilizando un mecanismo similar al anterior es posible detener ciertas pantallas mientras se hace el análisis, y se toman las decisiones pertinentes; al oprimir cualquier tecla se restablece la secuencia. Esta condición existe normalmente en la condición "...continuamos "

4. En cada pantalla existe la posibilidad REGRESO A MENU ANTERIOR, lo que facilita el control de errores de selección al usuario.

5. En los Menús más importantes existe la opción "AYUDA", para recordar al usuario las características más relevantes de cada selección posible.

6. Gracias a un procedimiento de "ventaneo" es posible manipular la información en la pantalla en forma rápida y eficiente. El renglón de "condición" nos indica el estado del sistema utilizando mensajes como: "...un momento...", "...en proceso...", "...lectura de archivos...", "grabación de archivos...", etc.

7. El sistema está integrado por diferentes programas independientes, direccionados utilizando una función de ENCADENAMIENTO. Esta configuración nos ha permitido hacer modificaciones y mejoras al sistema en forma simple y eficiente, dejando las puertas abiertas para la anexión de mayor número de opciones y programas complementarios.

8. Todos los archivos de datos generados durante la ejecución del programa tienen subsistencia independiente en el sistema operativo, es decir, que no se pierden al interrumpir el programa, y pueden ser manipulados externamente a este paquete.

Los programas de cómputo que forman el sistema están pensados como entes naturalmente separados, que permiten el análisis y modificación de las rutinas con un mínimo de esfuerzo, dejando la posibilidad de reescribir, si se considera necesario, programas completos del sistema. Esta característica es quizá la más importante, ya que el espíritu de "versatilidad" que impulsamos desde el inicio de este desarrollo no nos permite otra alternativa.

SISTEMA DE PROCESO PARA SEÑALES ULTRASONICAS

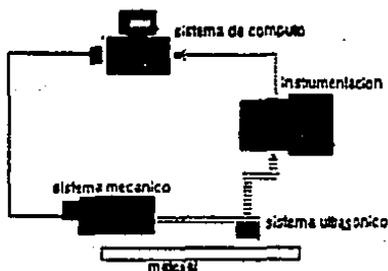
Laboratorio de Pruebas no Destructivas  
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES ELECTRICAS

MENU PRINCIPAL

- 1 Condiciones Iniciales
- 2 Control de Instrumentos
- 3 Presentacion Grafica
- 4 Procesamiento de senales
- 5 Ayuda

Seleccion--

Figura 2. Pantalla de presentación y Menú Principal



**SISTEMA AUTOMATIZADO DE INSPECCION**

**Figura 3** Diagrama de Bloques de un Sistema de Inspección Automatizado.

Al inicio del programa se hace la presentación del sistema en una PANTALLA DE PRESENTACION que permanece durante algunos instantes y que lleva directamente al MENU PRINCIPAL . Ver figura 2.

Desde este Menú hay acceso a las dos secciones más importantes del programa:

- I. PRESENTACION GRAFICA DE DEFECTOS POR TECNICAS DE PULSO-ECO
- II. PROCESAMIENTO DE SEÑALES EN EL DOMINIO DE LA FRECUENCIA.

A continuación voy a hacer una breve descripción del funcionamiento del sistema integrado a la instrumentación.

#### 4.7.1 PRESENTACION GRAFICA DE DEFECTOS POR TECNICAS DE PULSO ECO

Esta sección tiene como objetivo desarrollar un sistema de inspección automatizado para la presentación gráfica de defectos. En sí misma, junto con la instrumentación constituye un equipo muy versátil para la inspección de cualquier pieza.

Considerando la configuración de un sistema automatizado de inspección, que se muestra en la figura 3, únicamente es necesario modificar el sistema mecánico de posicionamiento para adaptar la geometría y las condiciones de barrido del objeto.

Esta sección está formada por tres rutinas:

Condiciones Iniciales  
Control de Instrumentos  
Presentación Gráfica

##### a. Condiciones Iniciales

La rutina de condiciones iniciales genera un archivo en el que se guardan los datos indispensables para llevar a cabo la presentación gráfica con la técnica pulso-eco. Algunas de estas variables son: la geometría y dimensiones de la pieza, el tipo de transductor, y algunas otras características de la prueba. Ver figura 4.

De este archivo, se van tomando los datos necesarios para alimentar toda la serie de programas subsecuentes.

**CONDICIONES INICIALES**

---

1	Identificación	:	B.ASME.5
2	Archivo de datos	:	blo2
3	Control excitador	:	EXCIT1
4	Control osc/cont	:	OSCLO1
5	Control posición	:	MANUAL
6	Geometría	:	EUCLEDIANA
7	Dimensiones (mm)	:	x= 226
8			y= 156
9			z= 76
10	Transductor	:	DUAL.5MHZ
11	Corr. Ang. Inc.(o)	:	0
12	Corr. Res. Lat.	:	RESLAT1
13	Vel.propa.(kw/s)	:	5.9

modificaciones..? (s/n)

**CONTROL DE INSTRUMENTOS**

---

La condicion actual es ...

Excitador CEXC1  
Osc/Contador COSC1

1 Regreso a menu principal  
2 Modificación  
3 Reconf. de instrumentos  
4 Ayuda

Seleccion--

Figura 4. Pantalla para establecer Condiciones Iniciales de Inspección.

Figura 5. Menu para el Control de Instrumentos.

## b. Control de Instrumentos

La rutina de control de instrumentos, permite a través de una operación muy simple establecer condiciones de operación específicas, tanto al excitador como al osciloscopio/contador. Asimismo, permite el registro de archivos de comandos para el control de los instrumentos. Ver figura 5.

## c. Presentación Gráfica

Por último, la rutina de presentación gráfica es la más importante de la sección; en ella, se despliegan en una sola pantalla tres "ventanas", que contienen: 1. información de la prueba, 2. los menús de control, y 3. el despliegue gráfico. Ver figura 6.

Esta rutina nos permite seleccionar el tipo de condición gráfica de la pieza, por ejemplo, cortes tipo B,C,D, 3-D, Isométrico; permite iniciar un barrido ya sea con un sistema manual ó con uno automático; permite hacer presentaciones gráficas de archivos pertenecientes a inspecciones anteriores; permite seleccionar el archivo de trabajo y el tipo de inspección por realizar. La mayoría de estas rutinas secundarias llaman a uno ó dos programas independientes.

Una de las ventajas de este sistema es que la captura de la inspección se hace en "tiempo real", de tal forma que el inspector es capaz de modificar la secuencia de "la condición gráfica" en el momento que así lo considere necesario.

Con esta sección el investigador y el inspector cuentan con un sistema de inspección automatizado y de gran precisión y versatilidad para la presentación de defectos.

De hecho, esta sección constituye todo un sistema de inspección automatizado independiente.

## 4.7.2 PROCESAMIENTO DE SEÑALES EN EL DOMINIO DE LA FRECUENCIA

Como comentábamos en el capítulo anterior, la necesidad de obtener información sobre la geometría, dimensiones reales y orientación de las discontinuidades en el interior de los materiales, ha provocado el desarrollo de nuevas técnicas para el análisis de las señales ultrasónicas.

Los métodos de evaluación por espectroscopia y técnicas similares, han tenido éxito únicamente en los últimos años, ya que gracias a una microcomputadora poderosa, es posible adquirir y procesar gran cantidad de información .

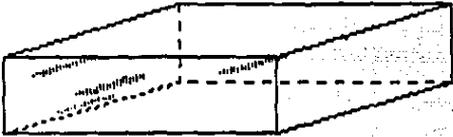
**PRESENTACION GRAFICA**

- Ident. : B.ASME.5
- Grafica : 3-DIMEN.
- Archivo : blo2
- Posicion: Auto
- n. x. y. z.

**MENU**

- 1 Condi. Graficas
- 2 Inicio de Captura
- 3 Grafica de archivo
- 4 Cambio de archivo
- 5 Salida a Menu Prin
- 6 Sel. posicionador

Selecion--



**PROCESAMIENTO DE SEÑALES**

- 1 Digitalizacion
- 2 Operaciones
- 3 Filtros
- 4 Archivos
- 5 Graficas
- 6 Tecnicas de Visualizacion
- 7 Ayuda
- 8 Salida a Menu Principal

Selecion...

Figura 6. Presentación Gráfica, Ventana de Información, Menú de control y gráficas.

Figura 7. Menú para el Procesamiento de Señales.

Esta rutina está compuesta por una serie de subprogramas que son, (ver figura 7):

Digitalización  
Operaciones  
Filtros digitales  
Gráficas

#### a. Digitalización

La primera de ellas adquiere del sistema de osciloscopio una señal previamente digitalizada, y es registrada en un archivo para su uso posterior. El formato es de 512 dígitos tipo ASCII con valores entre 0 y 1024.

La transferencia de datos se realiza a través de la interfase IEEE-488 controlada por la Microcomputadora.

El dispositivo de digitalización del sistema HP 1980B utiliza el procedimiento de captura por repetición, lo que lo hace lento en la captura de señales de más de 0.5 Mhz de frecuencia. Sin embargo, para esta etapa del desarrollo cumple con las metas establecidas.

Actualmente, el Instituto de Investigaciones Eléctricas, está desarrollando un dispositivo de conversión A/D de alta velocidad capaz de registrar señales de hasta 20 Mhz en un solo disparo.

#### b. Operaciones

La rutina de operaciones contiene una serie de procedimientos que son :

Transformada Rápida de Fourier (FFT)  
Transformada Rápida Inversa (IFT)  
Convolución de Funciones  
Deconvolución de Funciones  
Complemento en frecuencia

Ver Figura 8.

Las rutinas de FFT é IFT fueron tomadas de Brigham (1988), adaptándolas a nuestras necesidades específicas. El formato de los archivos de tiempo es únicamente una lista de 512 números separados por un <cr> retorno de carro en código ASCII. El formato de los archivos de frecuencia está constituido por parejas de números que representan la parte real y la parte imaginaria de cada banda; cada pareja está separada por un <cr>; el primer renglón indica el número de bandas que contiene el archivo, siendo hasta el momento la única opción la presencia de 256 bandas.

### OPERACIONES

- 1 FFT                     $F(B) = A$
- 2 IFT                     $IF(C) = D$
- 3 convolucion             $A * C = E$
- 4 deconvolucion         $A / C = E$
- 5 complemento         $CO(A) = B$
- 6 regreso a menu anterior

Selección...

### FILTROS

- 1 Wiener
- 2 Plano
- 3 Triangular
- 4 Hanning
- 5 Hamming
- 6 Kayser-Bessel
- 7 Salida a Menu anterior

Selección...

Figura 8. Operaciones entre funciones del Dominio de la Frecuencia.

Figura 9. Filtros Digitales.

Estos formatos se generan automáticamente durante los procesos de digitalización, operaciones y filtros y se requieren en todas las rutinas para asegurar la compatibilidad de los archivos de datos.

Las rutinas de Convolución y Deconvolución, están basadas en las fórmulas de multiplicación y división de números complejos [3], y requieren que las funciones de entrada se encuentren ya en el dominio de la frecuencia.

Todas estas operaciones son la base para el procesamiento de señales, ya que permiten la manipulación de la información y su libre transferencia del dominio del tiempo a la frecuencia y viceversa.

El complemento en frecuencia se refiere a un procedimiento en el que es posible "sustituir" algunas bandas de una determinada función por las de otra, permitiendo un cierto proceso de "actualización".

### c. Filtros Digitales

Una de las principales aplicaciones del procesamiento digital de señales es la facilidad para el diseño y aplicación de filtros digitales.

Esta rutina contiene un conjunto de programas para el filtrado y el procesamiento de las señales, entre ellos:

Filtro de Wiener  
Filtro Plano  
Filtro Triangular  
Filtro de Hanning

y actualmente se desarrollan los filtros de Hamming y Kayser-Bessel. Ver figura 9.

La expresión para el filtro de Wiener se tomó de Murakami (1978); y para el resto de los filtros se obtuvieron de Ziemer (1983) y Brigham (1978). Se hicieron las adaptaciones necesarias para ser incluidas en las rutinas.

Cada filtro requiere de una cierta información sobre las bandas por filtrar, frecuencia de corte, factores de corrección, etc. Para mayor detalle sobre su uso, consulte el apéndice A : "MANUAL DE USUARIO".

### d. Gráficas

Por último, la rutina de gráficas nos permite desplegar funciones en tiempo y en frecuencia con sistema de coordenadas automático.

**GRAFICAS**

---

- 1 Dominio de Tiempo
- 2 Dominio de Frecuencia
- 3 Ambos
- 4 Regreso a menu anterior

Seleccion...

Figura 10. Menú de Gráficas.

Es posible "moverse" sin problemas dentro de todas las rutinas de esta sección. Generalmente, al final de cada una de ellas se genera un nuevo archivo, que puede llamarse cuando sea necesario.

Existen las opciones de:

Gráfica de función de tiempo  
 Gráfica de función de Frecuencia  
 Gráfica de ambas funciones simultáneamente

Ver figura 10.

La rutina de gráficas de tiempo despliega escalas automáticas en amplitud, y en el eje de tiempo siempre dibuja 512 puntos.

La gráfica de frecuencia presenta en las ordenadas una escala de dB (decibeles) de 0 a -100, y en el eje de las abscisas presenta 256 bandas de frecuencia que son múltiplos de la frecuencia  $\omega_0$ , es decir, del inverso del período ocupado por la función en el dominio del tiempo. Es decir, que corresponde a la imagen del "Espectro de Amplitud", en la rama positiva.

#### 4.8 NUEVAS TENDENCIAS

Hoy en día la comunidad de desarrollo tecnológico está invirtiendo gran cantidad de recursos humanos y materiales en el área de Pruebas no Destructivas. La razón para esto parece ser clara: todavía no se cuenta con sistemas de inspección que resuelvan las necesidades de la industria actual en forma confiable, y mucho menos, la futura.

Definitivamente la instrumentación y el cómputo están involucradas en el rapidísimo desarrollo electrónico de los últimos años, y no hay razones para pensar que no seguirá así.

Esta tendencia nos hace creer que cada vez dispondremos de equipos de medición más precisos y rápidos, y de computadoras cada vez más poderosas y pequeñas. Con esta nueva generación de instrumentación será posible aplicar modelos cada vez más exactos para el análisis de señales, con lo que obtendremos grandes mejoras en la "confiabilidad" total de nuestras inspecciones.

Mientras tanto, es necesario perfeccionar los modelos de interpretación de señales, los modelos teóricos del comportamiento del ultrasonido en el interior de los sólidos, y mejorar el diseño de los transductores ultrasónicos.

En el siguiente capítulo analizaremos algunos de los resultados obtenidos con este sistema experimental, y relacionados con los modelos descritos en el capítulo anterior. De esta forma tratamos de demostrar su capacidad para el análisis, su adaptabilidad y la "amabilidad" de su ambiente de trabajo.

#### 4.9 BIBLIOGRAFIA

1. Ziemer R. E. (1983)  
SIGNALS AND SYSTEMS CONTINUOUS AND DISCRETE  
Mc. Millan Pub. Co. - U.S.A.
2. Papoulis A. (1962)  
THE FOURIER INTEGRAL AND ITS APPLICATIONS  
Mc.Graw-Hill - U.S.A.
3. Spiegel M.R. (1970)  
VARIABLE COMPLEJA  
Mc. Graw-Hill - México
4. Brigham E. O. (1988)  
THE FAST FOURIER TRANSFORM AND ITS APPLICATIONS  
Prentice-Hall U.S.A.
5. Hewlett Packard (1986)  
HEWLETT PACKARD INSTRUMENTATION AND SYSTEMS  
CATALOG  
H.P. Catalog 1986
6. Calva V. Mauricio (1986)  
EVALUACION ULTRASONICA DE MATERIALES  
Reporte Interno IIE, IIE/12/2219/I 01/p
7. Horacio L.S. (1988)  
SISTEMAS DIGITALIZADORES DE ALTA VELOCIDAD  
Comunicación Personal
8. Gómez Espinoza Alfonso (1988)  
DISEÑO DE UN SISTEMA PARA EL POSICIONAMIENTO DIGITAL DE TRANSDUCTORES ULTRASONICOS  
Tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias U.N.A.M
9. Murakami Y. (1978)  
AN APPLICATION OF WIENER FILTERING TO NONDESTRUCTIVE EVALUATION  
App.Phys. Lett. 33(8)

## CAPITULO 5 ALGUNOS RESULTADOS DE LA APLICACION DEL SISTEMA EXPERIMENTAL

### 5.1 INTRODUCCION

El principal objetivo de este trabajo fue el diseño y la configuración de un sistema experimental que permitiera analizar los modelos de comportamiento ultrasónico en los sólidos y facilitar su aplicación para resolver problemas tecnológicos de inspección.

Utilizando las técnicas y los modelos descritos en el capítulo 3 y el sistema diseñado en el capítulo anterior mostraremos las bondades del sistema configurado.

Es importante hacer notar en este momento que los resultados que aquí se muestran tienen como único objetivo presentar únicamente la capacidad del sistema para adquirir procesar y desplegar resultados, convirtiéndose en una herramienta para el análisis y desarrollo de nueva tecnología en la evaluación ultrasónica de materiales.

### 5.2 PRESENTACION GRAFICA DE DISCONTINUIDADES UTILIZANDO EL MODELO ELASTICO Y LA TECNICA PULSO-ECO

De acuerdo con el modelo elástico de comportamiento de las señales ultrasónicas en los sólidos, debemos esperar una reflexión de energía cuando haya una interacción con una interfase de diferente impedancia acústica.

Por otra parte, si se mide el tiempo que tarda en viajar un tren acústico estrecho dentro de un material con una velocidad de propagación conocida, seremos capaces de conocer la profundidad a la que se encuentra la discontinuidad.

Para mostrar la aplicación de este sistema utilizaremos un bloque de calibración diseñado por A.S.M.E. en su Código para Calderas y Recipientes a Presión, Sección V. Exámenes no Destructivos [1]. El diseño de este bloque se muestra en la figura 1.

Seleccionando un transductor dual de 5 Mhz, 0.5x0.5 pulg. y utilizando el método de contacto con glicerina como acoplante, es posible detectar la posición del fondo del bloque y de los barrenos que contiene (fig 1.). Si consideramos la velocidad de propagación de 5.9 mm/microseg. podemos estimar la profundidad a la que se encuentran estas disconti-

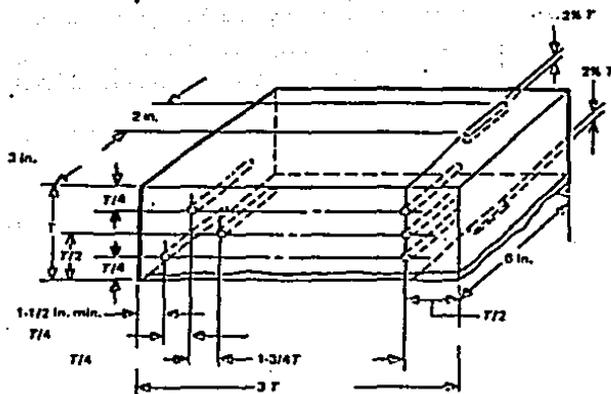


Figura 1. Block de Referencia. Construido con  $T = 3$  in. (76 mm). Extracto del "Código ASME para calderas y Recipientes a Presión", Sección V Exámenes no Destructivos.

nidades; 76 mm de espesor del bloque y posiciones de 17, 35 y 54 mm para cada uno de los barrenos.

El procedimiento descrito se conoce como el método convencional ultrasónico para la detección y localización de defectos. La misma técnica se utiliza para detectar discontinuidades en soldaduras, fundiciones, placas, etc.

A pesar de la simplicidad del bloque, vemos que aparecen indicaciones en la pantalla que no están directamente relacionadas con la presencia de los barrenos; algunas de ellas aparecen como segundo eco de los barrenos, y otras como conversión de modo, ondas de contorno, reflejos de la microestructura, y ruido del sistema electrónico.

El análisis de este tipo de señales puede realizarse conociendo la velocidad de propagación y descubriendo los caminos acústicos necesarios para lograr tales retrasos.

En este ejemplo tan simple, vemos que la técnica nos presenta algunas dificultades para la interpretación de las indicaciones. Esta complicación aumenta conforme intervienen con mayor fuerza otros factores, como son: geometría irregular, tamaño de grano muy grande, interfases microestructurales normales, posición de las discontinuidades cerca de cambios geométricos, etc.

Este experimento justifica todos los comentarios que hemos hecho a lo largo de este trabajo, respecto a la gran necesidad que existe de desarrollar procedimientos de detección y localización más efectivos.

Analizando nuevamente el experimento anterior, proponemos la inclusión en el sistema de un dispositivo que informe a una computadora la posición en la que se encuentra el transductor sobre la superficie del bloque, en forma tal que junto con la información de profundidad, formemos las coordenadas para localizar las discontinuidades.

Este sistema de posicionamiento puede basarse en una tableta gráfica digitalizadora, por ejemplo la H.P. 9111A, en la cual el cursor de la tableta está ligado al transductor; ó un sistema mecánico de posicionamiento automático, controlado por la misma computadora, que lleve el transductor siguiendo un determinado patrón de "barrido" sobre la superficie del bloque, que ha sido descrito con algún detalle en el capítulo anterior. [ Gómez E.A. (1988) ].

Durante y después de la captura de los datos, se puede hacer una manipulación de archivos para presentar vistas de la posición de las discontinuidades. Precisamente esta fue la base para el diseño de las rutinas de Presentación Gráfica descritas en el capítulo anterior.

Algunos de los resultados obtenidos de este bloque, uti-

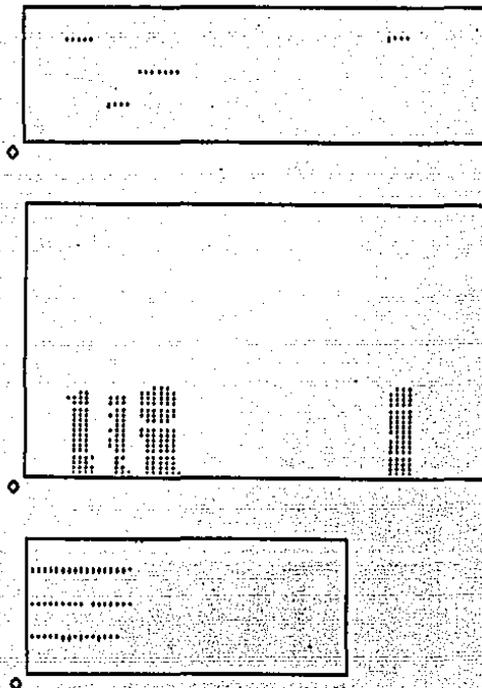


Figura 2. Resultados de la aplicación del Sistema Experimental al block ASME. En vistas tipo "B", "C", "D" (frontal, planta y lateral). Compare con la figura 1.

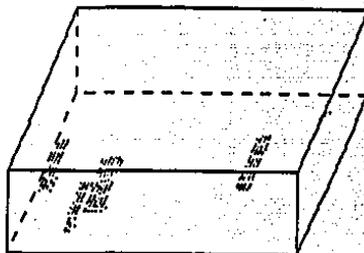
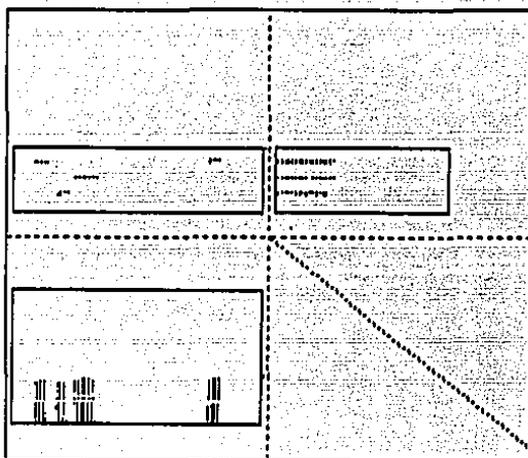


Figura 2. (cont.) Resultados de la aplicación del Sistema Experimental al block ASME. En vistas tipo "Isométrico" y "Tridimensional". Compare con la figura 1.

lizando la técnica de inmersión, con dos transductores Gilardoni 4 Mhz, 10 mm diámetro, siguiendo un patrón de barrido en zig-zag, y evaluando cada 3 mm. se obtuvieron resultados en presentaciones tipo B, C, D, 3-D é Isométrico, que se muestran en la figura 2.

Al ver estos resultados, en especial la vista tipo B, descubrimos la principal limitación del modelo elástico y de la técnica pulso-eco: no es posible reconocer la geometría de los barrenos, y por lo tanto, tampoco sus dimensiones reales.

Si bien los resultados observados constituyen un avance importante en la tecnología de evaluación ultrasónica, no está resuelto todo el problema. Estos resultados no son directamente aplicables en un estudio de mecánica de fracturas, donde la geometría y las dimensiones constituyen la base de los cálculos de concentración de esfuerzos, ya que nosotros no estamos dando esta información.

### 5.3 ANALISIS DE LA SENAL ACUSTICA PRODUCIDA POR LA INTERACCION DE UN HAZ ACUSTICO CON TRES GEOMETRIAS DIFERENTES

De acuerdo con el modelo y las consideraciones ondulatorias del ultrasonido, es posible esperar una correlación entre los resultados obtenidos del análisis y los resultados experimentales obtenidos con el sistema experimental objeto de este trabajo.

Para realizar esta comparación se llevó a cabo el siguiente procedimiento:

a. Se montaron tres geometrías regulares típicas (un cilindro de 1 mm de diámetro, una esfera de 4 mm de diámetro y una superficie cuadrada inclinada de 5 mm por lado ), y un plano perpendicular de referencia en un estanque de inmersión.

b. Se colocaron dos transductores Gilardoni, de 4 mhz, 10 mm de diámetro, colocados de tal forma que uno de ellos funciona como transmisor y otro como receptor, en un ángulo tal que se obtiene una zona de enfoque a 20 cm por debajo de la superficie del agua, y con el eje principal del sistema en posición perpendicular al plano de referencia.

c. Se registró y digitalizó la respuesta de la superficie de referencia, obteniéndose posteriormente su espectro de frecuencia. Ver figura 3. Aquí podemos notar lo esbelto de la banda de frecuencia, y la forma del tren acústico.

De hecho, con este procedimiento podemos obtener la función de transferencia y la respuesta al impulso de los trans-

Dominio de Tiempo trefa

Dominio de Frecuencia frefa

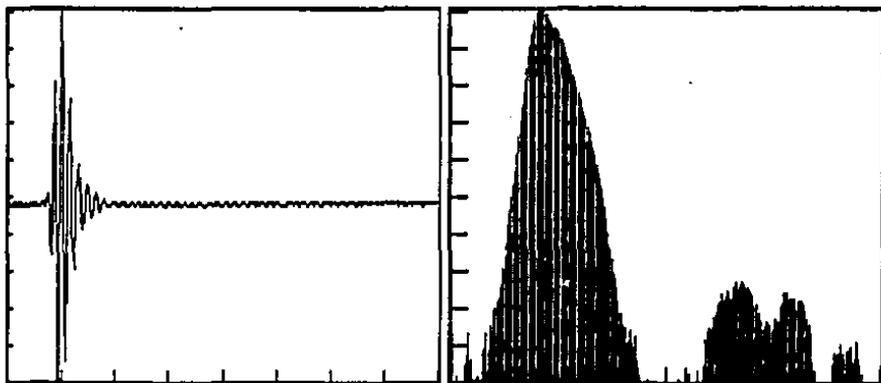


Figura 3. Función de Transferencia de un Transductor de 4 MHz de frecuencia central. Obtenido de la reflexión en una superficie plana perpendicular al haz.

[Amp. U.Arb -vs- t 14.4 microseg/div]  
 [Amp. -10dB/div -vs- Frec. 1.78 MHz]

ductores, constituyéndose en una herramienta para la caracterización de las sondas.

Las escalas de las gráficas son:

Dominio del tiempo: Unidades Arbitrarias de amplitud -vs- 14.4 microsegundos por división.

Dominio de la Frecuencia: 0 a -100 dB, -10 dB por división -vs- Frecuencia 1.78 MHz por división.

d. Se registraron y se digitalizaron cada una de las tres geometrías, obteniéndose también su espectro de frecuencia. Ver figuras 4, 5, y 6.

Estos resultados constituyen el primer paso en el análisis de las discontinuidades. A partir de este momento y gracias a este sistema seremos capaces de registrar los eventos y someterlos a análisis; por ejemplo, el espectro de amplitud de frecuencia mostrado para cada uno de ellos.

Observando con mayor detalle las gráficas mostradas en 4,5, y 6, descubrimos que efectivamente existe una relación entre la señal obtenida y la geometría del reflector. Esto es evidente tanto en el dominio del tiempo como en el de la frecuencia. También es notoria la influencia de la función de transferencia del transductor (figura 3) en los resultados del análisis en frecuencia.

#### 5.4 ANALISIS DE LAS SEÑALES DE ACUERDO AL MODELO DE KIRCHOFF

De acuerdo con el análisis realizado en el capítulo 3 sobre el modelo de difracción de Kirchoff, debemos esperar que en la información contenida en las figuras 4,5,6 se encuentren datos que nos permitan determinar la geometría de las discontinuidades e incluso sus dimensiones.

De acuerdo con ese modelo, debemos realizar la deconvolución de la información obtenida de la reflexión con las geometrías, entre la función de transferencia del transductor, de tal forma que "eliminemos" la influencia de su comportamiento en frecuencia.

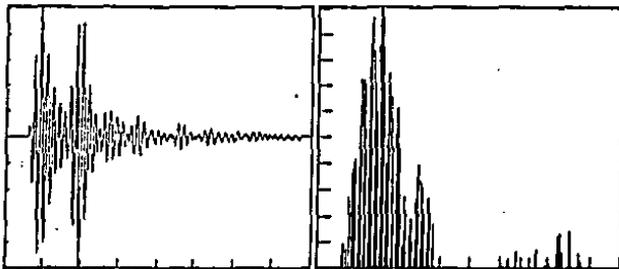
Esto quiere decir que en el dominio de la frecuencia, utilizando la nomenclatura del capítulo 3 :

$$(1) \quad F(f) = hr(f)/hcal$$

Observando con cuidado esta operación descubrimos que la función  $\{hcal(f)\}$  contiene números muy pequeños en las regiones de muy alta y muy baja frecuencia ( ver figura 3), (que de hecho representan el "nivel de ruido" del sistema), por lo

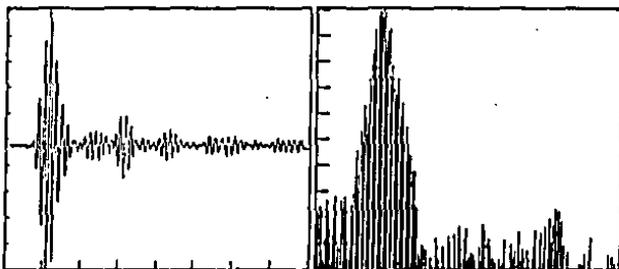
Domnio de Tiempo tc11

Domnio de Frecuencia fc11



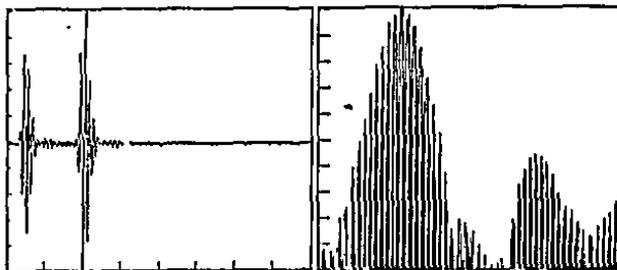
Domnio de Tiempo tesf41

Domnio de Frecuencia fesf41



Domnio de Tiempo tcua

Domnio de Frecuencia fcua



Respuesta al Impulso y Función de  
Transferencia de las tres geometrías.  
Figura 4. Cilindro  
Figura 5. Esfera  
Figura 6. Plano Inclinado  
[Amp. U.Arb vs t. 14.4 microseg/div]  
[Amp.-10dB/div vs Frec. 1.78 Mhz/div]

que debe esperarse una sobreamplificación de  $F(f)$  en esas regiones de frecuencia, que no necesariamente implica que ese sea su comportamiento real.

A partir de este momento, hay indicaciones de que la falta de información en ambas regiones nos va a provocar algunos problemas.

#### 5.4.1. APLICACION DE FILTROS DIGITALES

Con el fin de evitar la influencia de esos "ceros" en la ecuación (1) vamos a aplicarle a (hcal) dos filtros, uno de Wiener [6] y uno de Hanning [8].

El filtro de Wiener [6] tiene la forma siguiente:

(2)

$$W(f) = \frac{hcal^*}{hcal^* \cdot hcal + n^2}$$

donde: \* representa el conjugado complejo  
 $n^2$  es el nivel de ruido al cuadrado

El resultado que se obtiene al efectuar este filtro, es un aumento en la bandas de frecuencia que tienen amplitudes comparables a la banda de ruido en la función del denominador, evitando con esto divisiones entre números muy pequeños. En la (figura 7) se muestra que, al aplicar este filtro, es evidente que a (hcal) le aumentará la región de las bajas y las altas frecuencias. El filtro de Wiener se comporta como un filtro selectivo en las bandas de alta amplitud, fortaleciendo el resto de la función.

El filtro de Hanning [8] es un filtro de corte "pasabajas", que tiene el aspecto mostrado en la figura 7. Por su definición tiene pocas "fugas" (fenómeno de Gibbs) en el dominio del tiempo.

La forma de este filtro es:

(3)

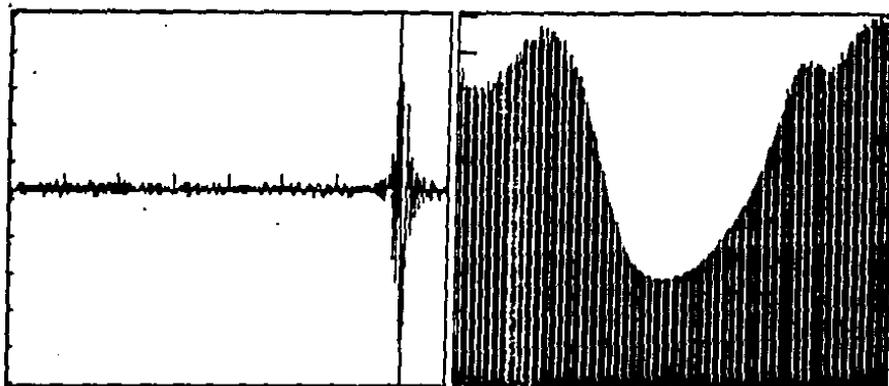
$$A(f) = \begin{cases} 0.5 + 0.5 \cos(\pi f / W), & |f| \leq W \\ 0, & \text{en cualquier otra parte} \end{cases}$$

siendo (f) la frecuencia de corte.

Al aplicar cada uno de los filtros y posteriormente efectuar la deconvolución se obtuvieron las funciones de

Dominio de Tiempo  $t_{win}$

Dominio de Frecuencia  $f_{win}$



Dominio de Tiempo  $t_{hann80}$

Dominio de Frecuencia  $f_{hann80}$

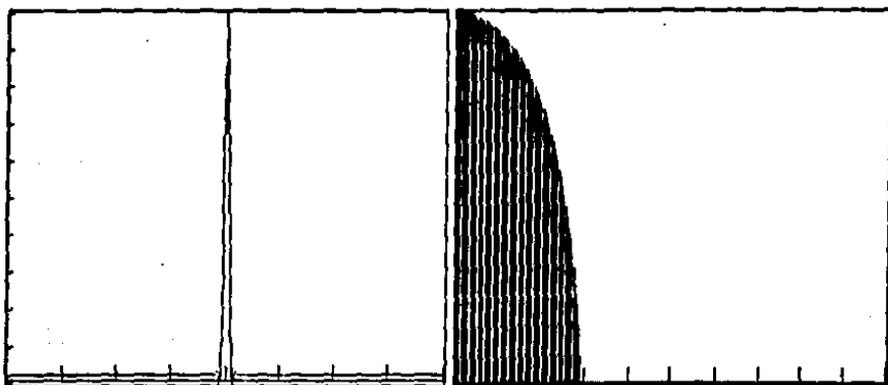
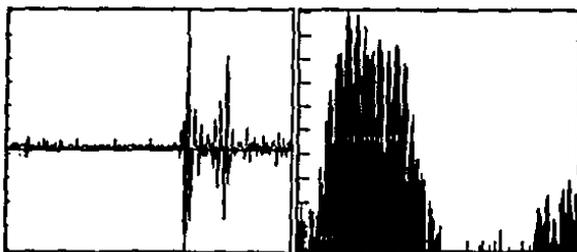
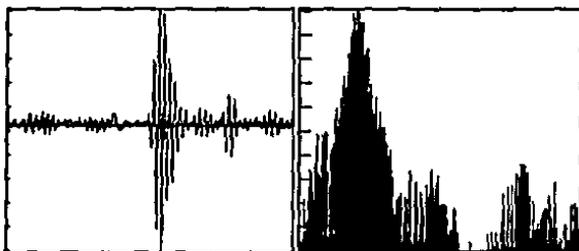


FIGURA 7. FUNCION DE WIENER  
FUNCION DE HANNING  
Observe la Forma del filtro  
en el dominio de la frecuencia.



Domnio de Tiempo suel11

Domnio de Frecuencia suel11

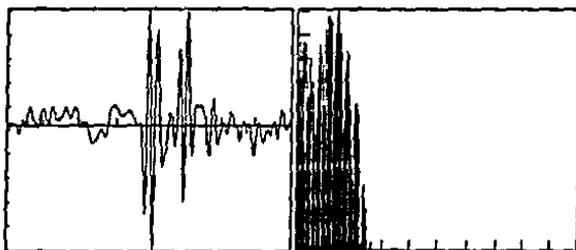


Domnio de Tiempo suel11

Domnio de Frecuencia suel11

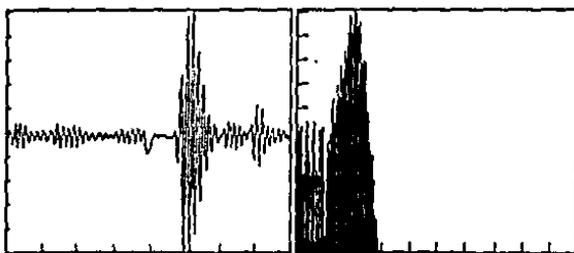


Deconvoluci3n y filtro de Wiener.  
 Figura 8. Respuesta del cilindro.  
 Figura 9. Respuesta de la esfera.  
 Figura 10. Respuesta del plano cuadrado inclinado.  
 [Amp. U.Arb vs 14.4 microseg/div]  
 [Amp. 10dB/div vs Frec. 1.78 Mhz/div]



Domnio de Tiempo tcfab00

Domnio de Frecuencia fc4fab00



Domnio de Tiempo tcfab00

Domnio de Frecuencia fc4fab00



Deconvolución y filtro de Hanning.  
 Figura 11. Respuesta del cilindro.  
 Figura 12. Respuesta de la esfera.  
 Figura 13. Respuesta del plano cuadrado inclinado.  
 [Amp. U.Arb vs 14.4 microseg/div]  
 [Amp. 10dB/div vs Frec. 1.78 Mhz/div]

transferencia de las geometrías experimentadas; posteriormente una transformada inversa de Fourier nos muestra las respuestas al impulso de esas geometrías.

En la figura 8, 9, y 10 se muestran estos resultados al utilizar el filtro de Wiener, mientras que en las figuras 11, 12 y 13 se grafican los resultados usando el filtro de Hanning.

Lo que nosotros esperábamos de este análisis era algo similar a los resultados obtenidos analíticamente y mostrado en la figura 7 del capítulo 3. pero no fue así; por lo menos no directamente.

#### 5.4.2 EL EFECTO DE LAS BAJAS FRECUENCIAS EN LA CARACTERIZACION DE LAS DISCONTINUIDADES

Que es lo que ha sucedido Lo primero que tenemos que buscar son las discrepancias entre nuestras características experimentales y las suposiciones teóricas.

Si revisamos con cuidado, observamos que todas los requerimientos teóricos fueron cumplidos en nuestro experimento, excepto uno.

El modelo de difracción, supone que se van a obtener datos, en todas y cada una de las frecuencias del espectro. Sin embargo, experimentalmente esto es imposible, y es más notorio si analizamos nuevamente la Figura 3, en donde nos damos cuenta que el ancho de banda de nuestro transductor es bastante limitado.

Para demostrar que esta limitación en frecuencia es la que está imponiendo restricciones en nuestro análisis, vamos a tomar la figura de respuesta al impulso obtenido analíticamente (figura 7, Capítulo 3) y le vamos a imponer la función de transferencia de nuestro transductor ( figura 3 ). Esto lo vamos a lograr efectuando la convolución de ambas funciones.

El resultado de esta operación se muestra en la (figura 14).

Este resultado nos muestra que existe buena correlación en la "forma" de las funciones obtenidas experimentalmente (figuras 4,5,6) , y la obtenida por convolución (figura 14).

Las diferencias entre ellas son provocadas principalmente porque en el resultado experimental aparece información que fue producida por otros factores como: conversión de modo, reflexión múltiple, propagación superficial y de contorno, etc. Sin embargo, considerando únicamente las señales de

mayor amplitud en las (figuras 4,5,6), encontramos una buena correlación con el resultado obtenido en la (figura 14).

Sin embargo, prácticamente no existe evidencia para clasificar la geometría de los reflectores utilizando la información proporcionada por la (figura 14).

Debemos suponer que la mayor cantidad de información se ha perdido; y precisamente demostraremos que esa información se encuentra en las bandas de baja frecuencia.

Para demostrarlo vamos a aplicar a las funciones teóricas de la (figura 7 capítulo 3) un filtro "pasa-bajas" de Hanning con frecuencia de corte en 25 bandas. El resultado de esta operación se muestra en la (figura 15). Es evidente la gran cantidad de información contenida en estas primeras 25 bandas; de hecho, la geometría de la función está determinada por ellas, y el resto de las bandas de mayor frecuencia únicamente determinan sus "contornos".

La limitación impuesta por la función de transferencia del transductor en las bajas frecuencias limita en forma sorprendente la capacidad del método de Difracción de Kirchoff para la caracterización de las discontinuidades.

Las técnicas de filtrado digital de Wiener y de Hanning no tuvieron éxito porque en las bajas frecuencias no existe información, sino únicamente ruido.

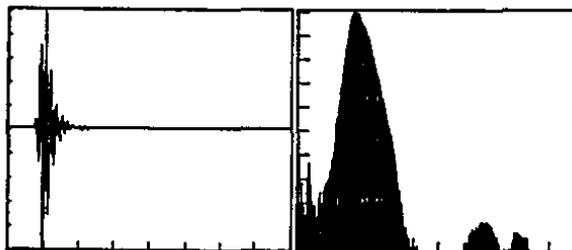
Podemos concluir este análisis diciendo que las técnicas de reconstrucción por difracción de Kirchoff están limitadas por los transductores utilizados, ya que impiden cumplir con uno de los requerimientos del modelo que es precisamente, la adquisición de información en "todas" las bandas de frecuencia.

#### 5.4.3 ALTERNATIVAS PROPUESTAS PARA CONTINUAR ESTE DESARROLLO

Lo primero que es importante destacar es la capacidad con que ahora contamos para llegar a resultados como el anteriormente presentado. Hasta el momento hemos sido capaces de llevar a cabo un análisis cuidadoso de las señales y hemos descubierto sus principales características.

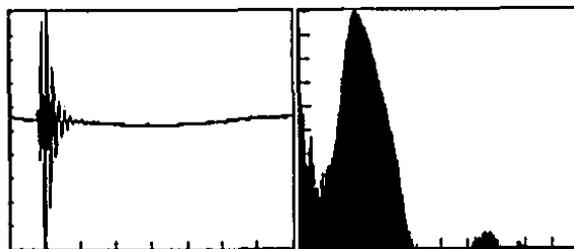
Nada de esto hubiera sido posible si no hubieramos contado con un Sistema Experimental los suficientemente versátil como para permitir el tipo de análisis descrito, tanto en los métodos Pulso-Eco para la presentación gráfica de defectos internos como en el procesamiento por difracción.

Existen algunas propuestas alternativas de solución para el problema del Modelo de Difracción de Kirchoff, como son :



Domnio de Tiempo tictlra

Domnio de Frecuencia tictlra



Domnio de Tiempo tictlra

Domnio de Frecuencia tictlra

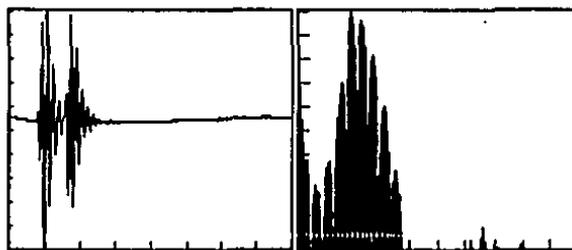


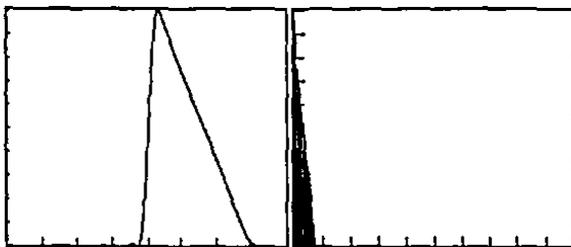
Figura 14. Convolución de la Respuesta al Impulso del modelo de Kirchoff con la Función de Transferencia del Transductor.

Cilindro, Esfera y Plano Inclinado.  
 [Amp. U.Arb vs t. 14.4 microseg/div]  
 [Amp. -10dB/div vs Frec. 1.78 Mhz/div]



Domnio de Tiempo f1c4n25

Domnio de Frecuencia f1c4n25



Domnio de Tiempo f1p4n25

Domnio de Frecuencia f1p4n25

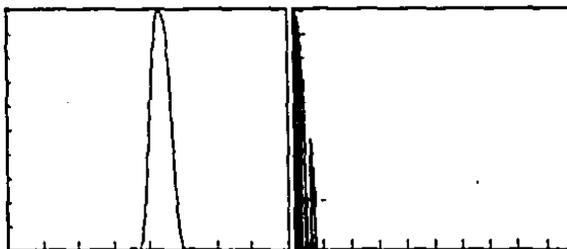


Figura 15. Respuesta al impulso del modelo de Kirchoff con un filtro de Hanning de 25 Wo Cilindro, Esfera y Plano Inclinado. [Amp. U.Arb -vs- t 14.4 microseg/div] [Amp. 10dB/div -vs- Frec. 1.78 Mhz/div]

1. Diseñar transductores ultrasónicos cuya función de transferencia ocupe una ventana más amplia de frecuencias. Las dificultades tecnológicas asociadas con las limitaciones naturales de los transductores piezoeléctricos han impedido obtener resultados satisfactorios hasta el momento. Una alternativa sería el generar ondas ultrasónicas a partir de otro tipo de transductores como son : ondas electromagnéticas ( E.M.A.T. ), ó Laser. ( Ver Silk M.G. (1984)).

2. Extrapolar las funciones en frecuencia hacia las zonas bajas. (Ver Tenoudji F.C. (1981)y(1982), Certo M, D'Alessio E. (1979)). Aunque esto necesariamente significa suponer que la información de las bajas frecuencias tiene determinada "forma" impuesta por la extrapolación, que no necesariamente coincide con el comportamiento real de las funciones.

3. Diseñar un dispositivo compuesto por varios transductores de una gama amplia de frecuencias, de tal forma que se obtenga información en casi todo el espectro. La principal dificultad que se prevee en este tipo de análisis, es la diferencia de comportamiento de los distintos transductores; los diferentes ángulos en los que estaría orientado el reflector para cada uno de ellos; la elaboración de un procedimiento que permita decidir cuáles son las partes relevantes del espectro que serán incluidas, y la forma de hacerlo para evitar "fugas" en el dominio del tiempo.

Gracias a este sistema experimental ahora nos es posible continuar la investigación para desarrollar tecnología en el área de inspección no destructiva utilizando métodos ultrasónicos.

## 5.5 BIBLIOGRAFIA

1. American Society of Mechanical Engineers (1983)  
CODIGO ASME PARA CALDERAS Y RECIPIENTES A PRESION  
A.S.M.E. U.S.A.
2. Gómez E. A. (1988)  
DISEÑO DE UN SISTEMA PARA POSICIONAMIENTO DIGITAL  
Facultad de Ciencias , Tesis de Licenciatura  
U.N.A.M.
3. Silk M. G. (1984)  
ULTRASONIC TRANSDUCERS FOR NONDESTRUCTIVE EVALUATION  
Adam Hilger Ltd. Bristol, U.K.

4. Certo M., D'Alessio E. (1979)  
CARACTERIZZAZIONE DI DIFETTI MEDIANTE ANALISI DE SEG-  
NAL ULTRASONORI : RESULTATI DI UNA SPERIMENTAZIONE  
ORIENTATIVA EFFETUATA CON RIFLETTORI ARTIFICIALI E  
RIALI IN BLOCHI DI ACCIAIO. C.I.S.E. N T 79.143
5. Tenoudi C. F. (1981)  
POLYNOMIAL EXTRAPOLATION TOWARD LOW FREQUENCIES OF  
THE SPECTRUM OF GATED ULTRASONIC ECHOES FOR DECONVO-  
LUTION : APPLICATION TO DEFECTS IN SOLIDS  
Quantitative N.D.E. Pergammon Press.
6. Murakami Y. (1978)  
AN APPLICATION OF WIENER FILTERING TO NONDESTRUCTIVE  
EVALUATION  
App. Phys. Lett. 33(8)
7. Tenoudji F. C. (1982)  
CHARACTERIZATION OF SURFACES BY DECONVOLUTION OF UL-  
TRASONIC ECHOES USING EXTENDED BANDWIDTH  
J. Appl Phys 53(6)
8. Brigham E. O. (1988)  
THE FAST FOURIER TRANSFORM AND ITS APPLICATIONS  
Prentice Hall, U.S.A.

## CAPITULO 6. CONCLUSIONES

Después de haber desarrollado este sistema y haber puesto a prueba su capacidad para desarrollar tecnología ultrasónica para la evaluación de materiales podemos expresar las siguientes conclusiones:

A. Los materiales que se utilizan en la construcción de todos los objetos están expuestos a tener "discontinuidades" que pueden afectar su funcionamiento; la calidad, como un requerimiento social de perfección, solo puede ser confiable si todas y cada una de las piezas fabricadas son inspeccionadas para evaluar la presencia de defectos y la gravedad de los mismos, de tal forma que sea posible establecer los tamaños críticos de defectos, las tendencias de propagación de fisuras y por lo tanto, la vida residual de los materiales, equipos y plantas industriales.

B. Los métodos no destructivos son la única alternativa viable para establecer un control total de calidad; específicamente la técnica ultrasónica ofrece grandes ventajas para su aplicación en campo y su desarrollo tecnológico. Sin embargo, el método convencional no nos da información sobre la geometría ni las dimensiones reales de las discontinuidades.

C. Es necesario estudiar el comportamiento del ultrasonido en los sólidos para poder desarrollar una tecnología más poderosa. Después de analizar el modelo elástico, se propone un procedimiento de visualización de discontinuidades utilizando la técnica pulso-eco. A pesar de que nos dice cual es su localización y distribución, no nos da información sobre su geometría ó dimensiones.

D. Utilizando un modelo ondulatorio basado en la difracción de Kirchoff, se establece que los paquetes acústicos reflejados por las discontinuidades poseen información contenida en todo el espectro de frecuencias para caracterizarlas completamente.

E. Para poder evaluar estos modelos y aplicarlos en el desarrollo de tecnología de evaluación no destructiva, es indispensable diseñar un sistema experimental versátil, cómodo y que crezca fácilmente.

F. El uso de instrumentos independientes, unidos con una interfase de control-comunicación eficiente, nos permite adecuar el sistema a las necesidades específicas de la experimentación. Asimismo, el sistema de programación para la adquisición, proceso y presentación gráfica de resultados, utilizando rutinas básicas independientes, da gran versatilidad para su modificación ó instalación.

G. La técnica de inspección por pulso-eco, basada en un sistema instrumental adecuado, es capaz de mostrar la presencia de discontinuidades en el interior de un material con toda claridad, y relacionando su posición y distribución con la geometría del objeto. Se aplicó esta técnica a un bloque de calibración.

H. Para evaluar el modelo ondulatorio de Kirchoff, se analizaron algunas geometrías básicas en inmersión, como son un cilindro, una esfera y una superficie plana, obteniendo resultados coherentes con las condiciones experimentales y los modelos aplicados. No obstante, existen limitaciones serias en los transductores piezoeléctricos utilizados. Se ofrecen algunas alternativas de solución.

I. Nuestro sistema experimental nos permitirá analizar en el futuro las nuevas tecnologías de caracterización como son: las técnicas de visualización basadas en la captura y digitalización de modos "A", para procesamiento posterior tipo S.A.F.T. (Synthetic Aperture Focusing Technology), así como la evaluación de metodologías de onda continua para la elaboración de tomografía y holografía ultrasónica.

J. Se propone también el diseño de instrumental específico que permita disminuir los precios y la incorporación de esta tecnología de "calidad" en la industria nacional.

APENDICE 1.      **MANUAL DE USUARIO  
SISTEMA PARA EL ANALISIS DE  
SENALES ULTRASONICAS (SYSUT)**

**Al.1 CARACTERISTICAS GENERALES**

Lenguaje de Programación: MS GW-BASIC

**Al.2 DESCRIPCION**

El Paquete de programas del "Sistema para el Proceso de Señales Ultrasonicas" (SYSUT), es un sistema de programas independientes que realizan varias funciones de control, adquisición, proceso y presentación gráfica.

Está integrado por medio de un MENU PRINCIPAL y una secuencia de MENUS SECUNDARIOS que llevan al usuario a seleccionar la operación que desea. Y está formado por dos programas que son:

-Pantalla de Presentación	SYSUT.BAS
-Menú Principal	MENUP.BAS

El paquete consta de dos secciones principales:

1.           PRESENTACION GRAFICA DE DISCONTINUIDADES
2.           PROCESAMIENTO DE SENALES ULTRASONICAS

Estas secciones están formadas por los siguientes programas:

1.           Presentación Gráfica de Discontinuidades

-Condiciones Iniciales	CONDINI.BAS
-Control de Instrumentos	CINSTRU.BAS
-Presentación Gráfica	PRESGRA.BAS
-Geometría en 3-D	CUBO3D.BAS
-Condiciones Gráficas	CONDGRA.BAS
-Gráficas de Archivo	GRAFAR.BAS
-Posicionador Manual	BARRIDO.BAS
-Posicionador Automático	BARAUT.BAS

## 2. Procesamiento de señales ultrasónicas

-Procesamiento	PROC.BAS
-Operaciones en frecuencia	OPERA.BAS
-Transf. Rápida de Fourier	FFT.BAS
-Transf. Inversa de Fourier	IFT.BAS
-Filtros digitales	FILTRO.BAS
-Presentación Gráfica	GRAFICAS.BAS

### Al.3 CONSIDERACIONES GENERALES PARA EL USUARIO

1. El paquete y los archivos de datos funcionarán en el "drive" de Default, en caso que se quiera leer ó guardar archivos en otro "drive" debe ser incluido en el "path" del archivo.

2. El paquete funciona dentro del ambiente GW-BASIC, se respetan todas las funciones del editor: para interrumpir el paquete, reiniciarlo, correr un programa por separado, etc. debe hacerse de acuerdo a este lenguaje.

3. Considerando las ventajas de GW-BASIC para reiniciar los programas (con LOAD", RUN, y CONTINUE ) se omiten en la mayoría de los casos rutinas de reacción al error, dejando al editor que mande sus propios mensajes.

4. La respuesta a la indicación "...Selección" debe responderse con un solo número, la captura será inmediata y no hay necesidad de <return>.

5. Siempre que aparezca la indicación "...Continuamos" basta con tocar cualquier tecla para continuar el programa.

6. En las pantallas principales existen rutinas de "Ayuda", que recuerdan al usuario las funciones principales de las posibles selecciones.

### Al.4 INICIO DEL PAQUETE

1. En el directorio del paquete (sysut), mande el comando AUTOEXEC, este cargará GW-BASIC y correrá el programa SYSUT.BAS

2. Directamente llegará al MENU PRINCIPAL

3. Seleccione la función deseada oprimiendo el número correspondiente.

## A1.5 CONDICIONES INICIALES

1. Si selecciona ...1 en el MENU PRINCIPAL irá a CONDICIONES INICIALES.
2. Condiciones iniciales genera un archivo de datos llamado COINI.DAT, en el que se registran todas las variables aquí contenidas, para ser usadas posteriormente en la rutina de PRESENTACION GRAFICA

3. El significado de cada renglón es:

- 1 Identificación: nombre de la pieza or inspeccionar
- 2 Archivo de datos: nombre del archivo donde se van a guardar los datos de la inspección
- 3 Control de Excitador: nombre de la secuencia para control del excitador de transductores
- 4 Control Osc/Cont : nombre de la secuencia para control del osciloscopio y contador
- 5 Control Posición : puede ser Manual ó Auto, dependiendo del sistema de posicionamiento que será utilizado durante la inspección
- 6 Geometría : identifica la geometría general de la pieza : Euclidiana, (cilindrica, etc. (futuro)).
- 7-9 Dimensiones: Da los valores de las coordenadas principales de la pieza por inspeccionar.
- 10 Transductor: Identificación del transductor
- 11 Corr. Ang. Ins.(o) : Angulo de incidencia del haz acústico.(futuro).
- 12 Corr. Res. Lat. : Archivo en donde se encuentran los factores de corrección para resolución lateral (futuro).
- 13 Vel. Propa (km/s): velocidad de propagación del sonido en el material por inspeccionar.

4. Para hacer modificaciones diga "S", é indique posteriormente el renglón a modificar y el dato separados por una coma.

5. Para salir, diga "N" en modificaciones diga "S" en "...salida a menu principal"

## Al.6 CONTROL DE INSTRUMENTOS

1. Si selecciona ...2 en MENU PRINCIPAL será llevado a CONTROL DE INSTRUMENTOS.

2. La pantalla le muestra los nombre de los archivos que contienen las secuencias de control tanto para el Excitador como para el Osciloscopio/Contador.

3. El significado de las opciones es:

- 1 Regreso a menú Principal ; para salir
- 2 Modificación ; lleva a otra pantalla donde se puede cambiar el nombre de los archivos de configuración
- 3 Reconfiguración de instrumentos ; lleva a otra pantalla donde :
  - 1 Salida a Excitador ; manda la secuencia de configuración al Excitador
  - 2 Salida a Osc/ Cont ; manda la secuencia de configuración al Osciloscopio-Contador.
  - 3 Nueva configuración ; permite modificar el contenido de los archivos de configuración
  - 4 Regresa a Menú Anterior
  - 5 Regresa a Menú Principal

## Al.7 PRESENTACION GRAFICA

1. Al seleccionar ...3 en el MENU PRINCIPAL lo lleva a la pantalla de PRESENTACION GRAFICA

2. Aparecen 3 ventanas : en la superior izquierda se incluyen las condiciones iniciales y algunos parámetros importantes de la inspección, como son : Identificación, Condición Gráfica, Nombre del archivo de datos Vigente, Tipo de posicionamiento mecánico, número de reflector, coordenadas del posicionador mecánico/ reflector.

3. En la ventana de abajo a la izquierda aparece un MENU de operación:

- 1 Condiciones Gráficas; permite seleccionar vistas tipo B, C, D, 3-D, é Isométricos de un block euclidiano.
- 2 Inicio de Captura; inicia la rutina de inspección, aparecen una serie de instrucciones para inicializar y para dar los parámetros de la prueba, por ejemplo: "...coloca la pluma en 0,0", "interrupción", "número de (mm) de renglón y columna, y número de columnas...", etc.
- 3 Gráfica de Archivo; permite ver archivos

- previamente adquiridos, estableciendo cualquiera de las condiciones gráficas.
- 4 Cambio de archivo; cambia el nombre del archivo vigente.
  5. Salida a Menú Principal ; salida
  6. Sel. Posicionador; Selecciona posicionador tipo Manual ó Automático.

#### A1.8 PROCESAMIENTO DE SEÑALES

1. Al seleccionar ...4 en el MENU PRINCIPAL, es llevado a la pantalla PROCESAMIENTO DE SEÑALES.

2. Esta pantalla llama en general a otros menús secundarios. Y requiere normalmente los nombres de los archivos que intervienen en los diferentes procesos.

3. Si selecciona 1 Digitalización ; Pide el nombre del archivo, y guarda 512 puntos ASCII provenientes de la memoria 1 del osciloscopio/contador.

4. Si selecciona 2 Operaciones ; lo lleva a otra pantalla con un menú de OPERACIONES que incluye:

- 1 FFT ; pide el nombre del archivo a ser transformado y el nombre del archivo resultado
- 2 IPT ; pide el nombre del archivo a ser antotransformado y el nombre del archivo resultado
- 3 Convolución ; pide el nombre de los dos archivos que intervienen y el archivo resultado (todos en el dominio de la frecuencia).
- 4 Deconvolución; pide el nombre de los dos archivos que intervienen y el archivo resultado (todos en el dominio de la frecuencia).
- 5 Complemento; pide el nombre de los archivos que se complementarán, las bandas de frecuencia, y el nombre del archivo resultado. (todos en el dominio de la frecuencia).
- 6 Salida a Menú Principal ; salida

5. Si selecciona 3 Filtros, es llevada a otro menú secundario de FILTROS:

- 1 Wiener ; pide el nombre del archivo por filtrar, el archivo de referencia, el nivel de ruido, y el nombre del archivo resultado. Genera automáticamente un archivo intermedio de nombre FWIN. (todos

en el dominio de la frecuencia).

- 2 Plano ; filtro rectangular, pide el nombre del archivo a filtrar y el de resultado, así como las bandas donde seharán los cortes.
- 3 Triangular; Pide el nombre de los archivos a filtrar y resultado. (futuro).
- 4 Filtro Hanning; Pide el nombre del archivo, las bandas de corte, y los factores de escala antes y después de la banda de corte.
- 5 Filtro Hamming ; Pide el nombre de los archivos a filtrar y los resultados (futuro).
- 6 Kayser-Bessel ; Pide el nombre del archivo de filtro, y las frecuencias de corte (futuro)
- 7 Salida a Menú anterior ; salida

6. Si selecciona 4 Archivos ; le aparece una lista del contenido de archivos con el formato XXXXXXXX. en el "drive" de default

7. Si selecciona 5 Gráficas ; es llevado a un menú secundario de GRAFICAS:

- 1 Graficas de Tiempo; Formato Amplitud contra 512 puntos . Pide el nombre del archivo en el dominio del tiempo; y pregunta si se quiere un corrimiento de 256 puntos.
- 2 Graficas de Frecuencia ; Formato dB de Amplitud contra 256 bandas defrecuencia multiples de  $W_0$ . Pide el nombre del archivo del dominio de frecuencia.
- 3 Ambos ; Grafica en la misma pantalla una función de tiempo y una de frecuencia.

8. Si selecciona 6 Técnicas de Visualización ; es llevado a un menú secundario de VISUALIZACION. En el futuro este contendrá rutinas para la adquisición y el proceso de visualización ultrasónica. (futuro).

9. Si selecciona 7 Ayuda; aparece un breve recordatorio de las funciones de cada opción.

10. Si selecciona 8 Salida a Menú Principal ; Salida.