

EVALUACIÓN DE LA INTEGRIDAD ESTRUCTURAL DE TUBERÍAS DE
PERFORACIÓN USANDO TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS ESPECIALES.

TATIANA ARDILA RINCON
GABRIEL FELIPE VILLALBA GIL

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA

2018

EVALUACIÓN DE LA INTEGRIDAD ESTRUCTURAL DE TUBERÍAS DE
PERFORACIÓN USANDO TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS ESPECIALES.

TATIANA ARDILA RINCON
GABRIEL FELIPE VILLALBA GIL

Trabajo de grado en la modalidad de proyecto de investigación para optar al título de
INGENIERO DE PETRÓLEOS

Director
MSc. OSCAR REY CASTELLANOS
Ingeniero Metalúrgico

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA

2018

DEDICATORIA

A Dios por guiarme a lo largo del camino, por darme fuerza y permitirme llegar hasta aquí, por darme la oportunidad de perseguir mis sueños y llevarme de su mano.

A mi madre Mercedes y a mi padre Hernán le doy infinitas gracias por darme el mejor ejemplo de lo que es ser una persona luchadora, por darme la vida, por apoyarme incondicionalmente en cada paso que doy, por la paciencia y por tanto amor. Los adoro y amo con todo mi ser.

A Diana, Natalia y Paula que son las mejores mujeres y hermanas que la vida me pudo regalar, siempre han estado presentes brindándome apoyo y no dejándome desfallecer en el camino.

A mi Nonita Marina por ser una segunda madre para mí, por ser una guerrera que me ha enseñado lo que es no rendirse bajo ninguna circunstancia, gracias por tanto nonita, te amo infinitamente.

A mis sobrinos Alejo y Lucci por alegrarme mis días con su inocencia y con su amor tan puro, porque quiero seguirlos viendo crecer y que se sientan felices y orgullosos de su Tía que los ama tanto.

A mi Novio Nicolás por ser mi compañero de vida, por creer en mí y caminar junto a mí a lo largo de estos 5 años, porque hemos estado en las buenas y en las malas, por tu amor, por tu paciencia y porque quiero seguir compartiendo miles de logros más junto a ti.

A todos los que hicieron parte de este proceso, a todos aquellos que me brindaron su amistad a lo largo del camino e hicieron de mi estadía un ciclo hermoso y lleno de muchas enseñanzas.

TATIANA ARDILA RINCÓN

A mi madre Ruth Delina, por su amor y apoyo incondicional, por sus consejos y valores, por creer en mí, por ser la fuente de energía y el pilar fundamental en mi vida. Te amo madre, gracias por ser quien me enseñó e inspiró a perseguir mis sueños y su vez poder brindarme todo con gran esfuerzo.

A mi abuelo Miguel, por la gran persona que es y que representa en mi vida, por ser ejemplo de sabiduría y experiencia, por ser pilar de apoyo y motivación. Abuelo gracias por ser El Roble que siempre acompaña mi camino.

A Mateo, Lorena y Camilo, por todos los bonitos momentos que hemos vivido, por la felicidad y diversas emociones que siempre me han causado, por ser el apoyo, la motivación y fuerza de grupo. Muchas gracias hermanos.

A mis tíos Edgar y Miguel, por brindarme su confianza, por siempre estar dispuestos a darme una mano y apoyo, por sus buenos consejos. Gracias por estar siempre presentes.

A mi padre Gabriel, por cada consejo, por los buenos momentos y por el apoyo que me ha brindado. Muchas gracias padre.

A todos los que hicieron parte de este proceso, a todos aquellos que me brindaron su amistad a lo largo del camino e hicieron de mi estadía un ciclo hermoso y lleno de muchas enseñanzas.

GABRIEL FELIPE VILLALBA GIL

AGRADECIMIENTOS

Los autores del presente trabajo hacemos reconocimiento a todos aquellos que nos acompañaron durante la realización de este trabajo, agradeciéndoles de todo corazón a:

- Universidad Industrial de Santander, por abrirnos sus puertas, por brindarnos una formación ética y profesional a lo largo de estos últimos años.
- MSc. Oscar Rey Castellanos, director de proyecto, por brindarnos su apoyo y amistad, permitirnos trabajar con junto a sus conocimiento y experiencia.
- A los Ingenieros Marco Antonio Bruges Larios, Yerson Sanchez y Pedro Ricardo Bejarano Camacho, miembros en los laboratorios de Calibración y NDT en Avianca, por permitirnos manifestar nuestros objetivos y brindarnos su ayuda con la persona adecuada para el desarrollo de este.
- Ingeniero Luis Fernando Villamizar Amador junto a su compañía GENERAL X RAY LTDA y todo su personal, Por recibirnos con las puertas abiertas dispuestos a compartir y enseñar el conocimiento y desarrollo que realizan día a día.
- A cada uno de los profesores y personal de la Escuela de Ingeniería de petróleos que se dedican a formar y acompañar estudiantes durante su estadía en la universidad.

CONTENIDO

	Pág
INTRODUCCIÓN	18
1. OBJETIVOS	19
1.1. OBJETIVO GENERAL	19
1.2. OBJETIVO ESPECIFICOS	19
2. TUBERIAS DE PERFORACIÓN Y SUS FALLOS	20
3. ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS	21
3.1. ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS CONVENCIONALES	22
3.1.1. INSPECCIÓN VISUAL	22
3.1.2. LÍQUIDOS PENETRANTES	23
3.1.3. PARTÍCULAS MAGNÉTICAS	23
3.1.4. RADIOGRAFÍA INDUSTRIAL	23
3.1.5. CORRIENTES INDUCIDAS	24
4. ULTRASONIDO	25
4.1. PARAMETROS Y CONCEPTOS BASICOS	25
4.2. TIPOS DE ONDA Y MODOS DE VIBRACIÓN	27
4.2.1. ONDA LONGITUDINAL O DE COMPRESIÓN	27
4.2.2. ONDA TRANSVERSAL O DE CORTE	28

4.2.3.	ONDAS SUPERFICIALES O DE RAYLEIGH	28
4.2.4.	ONDAS LAMB	29
4.2.5.	IMPEDANCIA ACÚSTICA	30
4.3.	TRANSMISIÓN Y DESCOMPOSICIÓN DE ONDAS	30
4.4.	GENERACIÓN Y RECEPCIÓN DE LAS ONDAS ULTRASÓNICAS	32
4.5.	DEFECTOLOGÍA POR ULTRASONIDO	34
4.6.	PALPADORES	34
4.6.1.	TIPOS DE PALPADORES	35
4.6.2.	PARTES DEL PALPADOR	37
4.7.	ACOPLANTES	37
5.	TÉCNICA PHASED ARRAY	39
5.1.	FORMACIÓN DEL HAZ ULTRASÓNICO	39
5.2.	REFLEXIÓN DE LA ONDA EN PHASED ARRAY	40
6.	METODOLOGÍA	42
6.1.	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	42
6.2.	DESARROLLO INVESTIGATIVO	42
7.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	54
8.	CONCLUSIONES	62
9.	RECOMENDACIONES	63

BIBLIOGRAFÍA

64

ANEXO I

LISTA DE SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS

END	: Ensayo no destructivo
PA	: Phased Array
VT	: Inspección visual
PT	: Líquidos penetrantes
MT	: Partículas magnéticas
RT	: Radiografía Industrial
ET	: Corrientes de Eddy
UT	: Ultrasonido
OD	: Diámetro Externo
A	: Amplitud
f	: Frecuencia
λ	: Longitud de onda
c	: Velocidad acústica
v	: Velocidad máxima de vibración
p	: Presión acústica
α_1	: Ángulo de incidencia de la onda incidente.
α_2	: Ángulo de incidencia de la onda refractada.
C_1	: Velocidad del sonido en el medio de la onda incidente.
C_2	: Velocidad del sonido en el medio de la onda refractada.
C	: Grados Celcius

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Ventajas y desventajas de la tecnología Phased Array en la caracterización, inspección y uso de medición. Realizado por los autores.	55
Tabla 2. Análisis comparativo entre la tecnología Phased Array y el END de UT convencional. Realizado por los autores.	57
Tabla 3. Análisis teórico para la implementación de la técnica Phased Array en tuberías de perforación.	60

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Representación gráfica de una onda, Amplitud de la onda y Longitud de onda. Figura reproducida de la ref [1]. **25**
- Figura 2.** Representación de una onda longitudinal por medio de un resorte, donde puede observarse un movimiento en la misma dirección de la onda, zonas de compresión y zonas de depresión. Figura reproducida de la ref [1]. **28**
- Figura 3.** Representación de una onda transversal por medio de un laso donde puede observarse movimiento perpendicular al movimiento de la onda. Figura reproducida de la ref [1]. **28**
- Figura 4.** Descripción del movimiento elíptico de las partículas en vibración con una dirección de propagación sobre una superficie. Figura reproducida de la ref [1]. **29**
- Figura 5.** Representación de ondas Lamb por vibraciones asimétricas y vibraciones simétricas. Figura reproducida de la ref [1]. **29**
- Figura 6.** Descripción del fenómeno de reflexión a través de una superficie de incidencia. Figura reproducida de la ref [1]. **31**
- Figura 7.** Descripción del fenómeno de refracción de una onda que cambia de medio. Figura reproducida de la ref [1]. **31**
- Figura 8.** Modos de barridos electrónicos sin retardo, barrido con 30° de inclinación, barrido con enfoque y barrido con enfoque de 30° de inclinación. Figura modificada y reproducida de la ref [1]. **39**
- Figura 9.** Presentación grafica de lo que muestra en pantalla del equipo la inspección por Phased Array por la proyección de la onda acústica sobre una placa. Figura modificada y reproducida de la ref [1]. **40**
- Figura 10.** Equipo Phased Arrey Sonatest VEO 16:64 y componentes del equipo: a) Vista frontal del equipo donde se encuentra su software de funcionamiento, pantalla, panel de botones y distintos conectores. b) Vista lateral izquierda donde se observa conectores para

carga, USB y memorias de almacenamiento externo. c) Vista lateral derecha donde se observa diferentes conectores para palpadores/receptores. d) Conector del elemento piezoeléctrico. e) Elemento piezoeléctrico de 16:64. f) Palpador lineal de forma rectangular de cuarzo. Figuras realizadas por los autores. **43**

Figura 11. a) Bloques rectangulares de calibración de acero para inspecciones de defectologías. b) bloques de calibración de acero para inspecciones de espesores de pared. Figuras realizadas por los autores. **46**

Figura 12. a) Inspección visual a tramo de tubería de perforación con OD de 3 ½". b) Area establecida para inspeccionar cualquier tipo de defectología en tubería de perforación con OD de 3 ½". Figuras realizadas por los autores. **47**

Figura 13. a) Determinación de Glicerina para uso como acoplante de la inspección. b) Aplicación del acoplante directamente en la zona a inspeccionar en tubería de perforación con OD de 3 ½". Figuras realizadas por los autores. **49**

Figura 14. Palpadores para diferentes geometrías de superficies a inspeccionar con material de apoyo de amortiguación de neopreno. Figuras realizadas por los autores. **50**

Figura 15. a) Proceso de inspección de la técnica Phased Array a tramo de tubería de perforación con OD de 3 ½", utilizando palpador para superficies cilíndricas. b) Proceso de barrido sectorial en tramo de tubería de perforación con OD de 3 ½". c) Indicaciones sub-superficiales halladas en los instantes que el palpador estuvo en contacto al tramo de tubería de perforación de Od de 3 ½". Figuras realizadas por los autores. **50**

Figura 16. a) Registro en archivo PDF de la inspección lineal en busca de defectologías sub-superficiales con el equipo Sonatest VEO 16:64 Phased Array sobre tramo de tubería de perforación con OD de 3 ½". b) Registro en archivo PDF de la inspección sectorial en busca de defectologías sub-superficiales con el equipo Sonatest VEO 16:64 Phased Array sobre tramo de tubería de perforación con OD de 3 ½". Figuras tomadas del registro de inspección del equipo Phased Array, ver anexo A. **52**

Figura 17. Equipo Sonatest D20 Scan A ultrasonido convencional, en proceso de calibración para la inspección de los tramos de tuberías de perforación. Figura realizada por los autores. **53**

Figura 18. Cuadro de jerarquía de los END con respecto al tipo de defecto o discontinuidad en una inspección. Figuras realizadas por los autores. **54**

Figura 19. a) Indicación hallada con el equipo Sonatest D20 Scan A ultrasonido convencional, en el área de interés para la inspección tramo de tubería de perforación. b) Indicaciones halladas con el equipo Phased Array Sonatest VEO 16:64, en la misma área de inspección del tramo de tubería de perforación inspeccionada con el equipo Sonatest D20 Scan A ultrasonido convencional. Figuras realizadas por los autores **58**

RESUMEN

TÍTULO: EVALUACIÓN DE LA INTEGRIDAD ESTRUCTURAL DE TUBERÍAS DE PERFORACIÓN USANDO TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS ESPECIALES*

AUTORES: Ardila Rincon, Tatiana y Villalba Gil, Gabriel Felipe**

PALABRAS CLAVES: Tuberías de perforación, técnicas no destructivas especiales, discontinuidades, deterioros, caracterización, medición, Phased Array.

DESCRIPCIÓN: En la industria petrolera específicamente en la rama de la perforación se conoce la susceptibilidad de las tuberías de presentar fallas y deterioros por el trabajo al que son expuestas (altas presiones, temperatura, torceduras, colapso, fatiga y demás), esto genera la necesidad de contar con fundamentos teóricos y criterios técnicos para la evaluación de la integridad de estos componentes, ya que teniendo claro estos fundamentos se puede evitar grandes pérdidas de tiempo y dinero. Es por esto que se necesita un buen enfoque sistemático sobre su inspección y funcionamiento, en este punto es donde surgen en el mundo diferentes técnicas no destructivas especiales que posibilitan la caracterización del estado en que se encuentra la tubería. Una de las técnicas para la inspección de discontinuidades superficiales y sub-superficiales para las tuberías de perforación es Phased Array que viene en auge en otra áreas dentro de la ciencia de los materiales y de la ingeniería de petróleos, esta técnica brinda una mayor facilidad en el hallazgo de indicaciones en la tubería beneficiando el proceso de inspección en comparación con otros ensayos no destructivos convencionales, del mismo modo en su aplicación ya que es sencilla y rápida en cuanto a su manipulación. Este trabajo tiene la finalidad de presentar la implementación de esta técnica para diagnosticar y evaluar la integridad estructural de las tuberías de perforación en la industria petrolera.

*Proyecto de grado (modalidad de proyecto de investigación.)

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos.

Director: MSc. Oscar Rey Castellanos.

ABSTRACT

TITLE: EVALUATION OF THE STRUCTURAL INTEGRITY OF DRILLING PIPES USING SPECIAL NON-DESTRUCTIVE TECHNIQUES. *

AUTHORS: Ardila Rincon, Tatiana and Villalba Gil, Gabriel Felipe **

KEYWORDS: Drilling pipes, Non-destructive specials testing, discontinuities, deteriorations, characterization, measurements, Phased Array.

DESCRIPTION: In the oil industry, specifically in the field of drilling, the susceptibility of the pipes to faults and deterioration due to the work to which they are exposed (high pressures, temperature, kinks, collapse, fatigue and others) is known, this generates the need to have theoretical foundations and technical criteria for the evaluation of the integrity of these components, since having clear these fundamentals can avoid large losses of time and money. This is why a good systematic approach to its inspection and operation is needed, at this point is where different non-destructive special techniques arise in the world that enable the characterization of the state in which the pipe is located. One of the techniques for the inspection of surface and sub-surface discontinuities for drilling pipes is Phased Array, which is booming in other areas of material science and petroleum engineering. This technique provides greater ease in the finding of indications in the pipeline benefiting the inspection process in comparison with other conventional non-destructive tests, in the same way in its application since it is simple and fast in terms of handling. This work has the purpose of presenting the implementation of this technique to diagnose and evaluate the structural integrity of drilling pipes in the oil industry.

*Degree project (modality, research project.)

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos.
Adviser: MSc. Oscar Rey Castellanos.

INTRODUCCIÓN

En la industria petrolera específicamente en la rama de la perforación se conoce la susceptibilidad de las tuberías de presentar fallas y deterioros por el trabajo al que son expuestas (altas presiones, temperatura, torceduras, colapso, fatiga y demás), esto genera la necesidad de contar con fundamentos teóricos y criterios técnicos para la evaluación de la integridad de estos componentes, ya que teniendo claro estos fundamentos se puede evitar grandes pérdidas de tiempo y dinero.

Es por esto que se necesita un buen enfoque sistemático sobre su inspección y funcionamiento, en este punto es donde surgen en el mundo diferentes técnicas no destructivas especiales que posibilitan la caracterización del estado en que se encuentra la tubería.

Una de las técnicas para la inspección de discontinuidades superficiales y sub-superficiales para las tuberías de perforación es Phased Array que viene en auge en otra áreas dentro de la ciencia de los materiales y de la ingeniería de petróleos, esta técnica brinda una mayor facilidad en el hallazgo de indicaciones en la tubería beneficiando el proceso de inspección en comparación con otros ensayos no destructivos convencionales, del mismo modo en su aplicación ya que es sencilla y rápida en cuanto a su manipulación.

Se pretende dar a conocer la aplicabilidad y el beneficio de su uso en la línea de perforación con el fin de que nuevas generaciones tengan una base para profundizar más dentro de este campo y puedan seguir desarrollando diferentes trabajos de investigación que ayude a la industria petrolera a concientizarse en la importancia de estas técnicas no solo en la parte de perforación si no en las distintas ramas que tiene la ingeniería de petróleos.

1. OBJETIVOS

1.1.OBJETIVO GENERAL

Presentar la técnica Phased Array como avance e innovación tecnológica para las inspecciones de tuberías de perforación.

1.2.OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Exponer el funcionamiento y los alcances de la técnica Phased Array como propuesta en la inspección de tuberías de perforación.
- Aplicar la técnica a tramos de tuberías de perforación defectuosas.
- Comparar la técnica Phased Array con el END de Ultrasonido convencional.
- Analizar e identificar las ventajas y desventajas de la técnica Phased Array como propuesta para la inspección de tuberías de perforación.

2. TUBERIAS DE PERFORACIÓN Y SUS FALLOS

Las tuberías de perforación son una parte de la cadena de perforación en general, están hechas generalmente de aceros de alta resistencia. Son una elección apropiada del material y el ambiente de trabajo en esencial para una utilización efectiva. Debido a que están diseñadas para soportar su propio peso para longitudes combinadas que a menudo son bastante largas y desgastadas en el subsuelo, los tubos de acero endurecidos son costosos. Los aceros diseñados para fabricar se producen utilizando etapas de fabricación y tratamiento térmico de series específicas para lograr las químicas, resistencias, microestructuras y dureza adecuadas para soportar el funcionamiento a largo plazo en entornos difíciles dentro de las operaciones de perforación.

Los fallos en las perforaciones son frecuentes en las operaciones de perforación. Éstos se pueden clasificar en una de las categorías siguientes: torcedura causada por el esfuerzo de torsión excesivo; Separación debido a la tensión excesiva; Explosión o colapso debido a presión interna excesiva o presión externa, respectivamente; O fatiga como resultado de cargas mecánicas cíclicas con o sin corrosión.

Las fallas pueden ocurrir de muchas maneras que incluyen selección inadecuada de materiales, procesamiento inadecuado, diseño inadecuado, mal uso de un componente y mantenimiento inadecuado.

3. ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS

Los ensayos no destructivos (END), son una serie de pruebas practicadas a diversos tipos de materiales con el propósito de proporcionar información acerca del objeto ensayado. Se consideran no destructivas porque implican un daño imperceptible o nulo sobre los materiales, es decir, su aplicación es inofensiva para la integridad de los objetos ensayados, obligados a adaptarse y no alterar las propiedades físicas, químicas, mecánicas o dimensionales.

Todos los END están basados en principios físicos, lo que significa que se basan en la determinación de alguna propiedad física del material o de su variación. Esto sirve para medir indirectamente lo que no se puede medir directamente, permite la caracterización del material o de la detección de discontinuidades.

Una variación local de la propiedad física del material u objeto ensayado sirve de fundamento al método del END constituyendo una indicación. La indicación implica un cambio o alteración local de la naturaleza o estado del material.

En cuanto a las aplicaciones de END, en general, cubren tres amplias áreas:

a.) Defectología: Detección de heterogeneidades, discontinuidades, etc. Detectar antes y durante el servicio la indicación de posibles fallos antes que realmente se presenten.

El conocimiento del origen de una discontinuidad es muy importante para llevar acciones correctivas.

b.) Caracterización de los materiales: identificación de las propiedades de los materiales y del grado de fiabilidad de las mismas; características químicas, estructurales, mecánicas, etc.

c.) Metrología: El control dimensional garantiza que los objetos están completos, son dimensionales y geoméricamente correctos y están montados en el orden establecido.

Las etapas de inspección de un material mediante END, por lo que respecta a problemas de defectología, caracterización y metrología, se concentra básicamente en las cuatro siguientes:

- Elección del método y técnicas adecuadas.
- Obtención de las indicaciones.
- Interpretación de las indicaciones.
- Evaluación de las indicaciones.

3.1. ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS CONVENCIONALES

Los tipos END utilizados actualmente son:

- Inspección visual
- Líquidos penetrantes
- Partículas magnéticas
- Radiografía industrial
- Corrientes inducidas

3.1.1. Inspección visual. Es el método más empleado e importante, aunque en muchas ocasiones no se es consciente de ello. Se considera inspección visual (VT). En relación con otros END, juega un papel de primera magnitud al utilizarse para adquirir visualmente la información proporcionada por otros métodos o bien al ejercerse antes de someter al material a otro ensayo, lo que permite rechazar directamente objetos defectuosos e identificar irregularidades no significativas que pueden dar lugar a falsas indicaciones.

Es aplicación característica de la inspección visual determinar, entre otros aspectos, la condición superficial, la alineación de superficies acopladas, la protección de las piezas, el grado de acabado de un cordón de soldadura, la evidencia de fugas y otros.

3.1.2. Líquidos penetrantes. El ensayo por líquidos penetrantes (PT) se define como el END basado en un sistema que comprende un penetrante, un método de eliminación de exceso de penetrante y un revelador, que proporcionan indicaciones visibles de las discontinuidades abiertas a la superficie.

Está basado en la utilización de un líquido que posee características fisicoquímicas como el efecto de la capilaridad, que la hace capaz de penetrar en discontinuidades abiertas a la superficie, de forma que, al limpiar el exceso de líquido superficial, quede solamente el introducido en las grietas, para posteriormente, ayudado casi siempre por la acción de un agente denominado revelador, salir y señalar sobre la superficie las zonas en las que existen discontinuidades.

El campo de aplicación de los líquidos penetrantes se extiende a cualquier tipo de industria en donde sea necesario detectar discontinuidades superficiales en materiales metálicos o no metálicos, con la única condición de que la superficie no sea porosa.

3.1.3. Partículas magnéticas. El ensayo por partículas magnéticas (MT) se utiliza el efecto que produce un campo magnético al atravesar un material ferromagnético, es decir, si una pieza se coloca formando parte de un circuito electromagnético y se pulveriza con limadura de hierro, se producen acumulaciones en algunas zonas que son precisamente en donde existen discontinuidades, como si formasen un puente metálico para suplir la falta de material.

El ensayo por partículas magnéticas es un método de detección de discontinuidades superficiales y sub-superficiales en materiales magnetizables (materiales ferromagnéticos). Resulta ser uno de los END más rápidos, económicos y de mayor sensibilidad para este tipo de discontinuidades.

3.1.4. Radiografía industrial. El método de radiografía (RT) se basa en las propiedades que ciertas radiaciones electromagnéticas, denominadas radiaciones ionizantes o penetrantes.

Consiste en imprimir sobre una película fotosensible la sombra producida por las irregularidades externas e internas de un objeto. Para la producción de dicha sombra se requiere la utilización de tres elementos: foco emisor, objeto y película, cuya disposición no puede dejarse al azar y debe ser tal que el objeto se encuentre entre la fuente y la película.

La radiografía es susceptible de ser aplicada a cualquier tipo de material y puede emplearse en la detección de discontinuidades, verificación de montajes, comprobaciones de estados internos, etc.

3.1.5. Corrientes inducidas. Los métodos de ensayos de corrientes inducidas (ET) consisten, en generadores de impulsos eléctricos de la frecuencia adecuada, a los que se conectan, básicamente, una bobina inductora para inducir corrientes sobre el material y otra destinada a ser inducida. La corriente inducida por el material es amplificada y se puede representar en un osciloscopio o en una pantalla digital.

Generalmente, la bobina va montada en una unidad, conocida como palpador, que se aplica unas veces sobre el material, se introduce en el interior de los tubos o se mete en el interior de una bobina. En cualquier caso, el ensayo requiere patrones de características conocidas para comparar la respuesta.

4. ULTRASONIDO

El método de inspección por ultrasonido se basa en la medición de la propagación del sonido en el material a analizar, su funcionamiento se basa en la impedancia acústica, que se manifiesta como el producto de la velocidad máxima del sonido y la densidad del material. Los equipos de ultrasonido que se utilizan actualmente permiten detectar discontinuidades superficiales, sub-superficiales e internas.

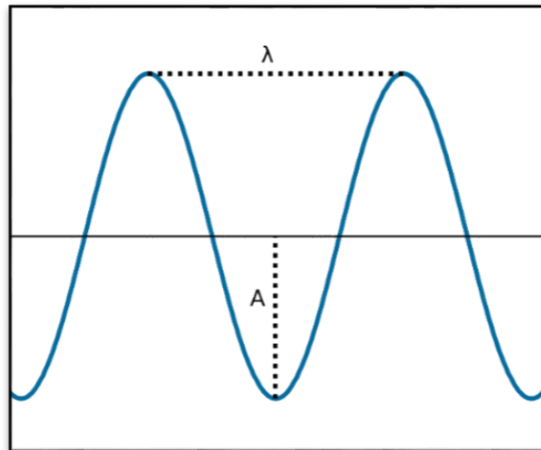
Los ultrasonidos son ondas del mismo tipo que los sonidos audibles, diferenciándose únicamente en la frecuencia de operación y forma de propagación. Los ultrasonidos operan con frecuencias por encima de la zona audible del espectro acústico. Las frecuencias utilizadas en los ensayos para el control de heterogeneidades en ensayos de materiales metálicos se realizan con frecuencias generalmente comprendidas entre 1 y 25 MHz.

4.1.PARAMETROS Y CONCEPTOS BASICOS

Con el fin de comprender mejor la técnica de ultrasonido se explicarán los principios básicos de la física de la propagación de ondas y la acústica a continuación:

Onda: Propagación de una oscilación provocada por la vibración de las moléculas que constituyen un material, en la figura 1 se observa la representación gráfica del comportamiento de una onda.

Figura 1. Representación gráfica de una onda, Amplitud de la onda y Longitud de onda. Figura reproducida de la ref [1].



Oscilación: Cambio periódico de la condición o el comportamiento de un cuerpo.

Amplitud (A): Es el desplazamiento máximo de la partícula de su posición de equilibrio, en la figura 1 se observa la amplitud de una onda.

Frecuencia (f): Es el número de oscilaciones completas que la partícula realiza por segundo. Se mide en ciclos/segundos. Los rangos de frecuencia para distintos tipos de ondas son los siguientes:

- **Subsónico:** $f < 16$ Hz, en este rango no se escucha ningún tono, solo es perceptible la presión.
- **Sónico:** $16 \text{ Hz} < f < 20$ kHz, rango audible para el ser humano.
- **Ultrasónico:** $f > 20$ kHz.

Longitud de onda (λ): Es la distancia entre dos planos de partículas que se encuentran en el mismo estado de movimiento. La longitud de la onda es inversamente proporcional a la frecuencia, en la figura 1 se observa la longitud de onda.

Velocidad acústica (c): Es la velocidad de propagación de la onda acústica a través del medio. Es constante y característica de cada material, sea cual sea la frecuencia. En los metales, sobre todo, podemos afirmar que es constante, ya que las mínimas variaciones

debidas a temperatura y presión, son despreciables. No ocurre lo mismo en líquidos y gases, ya que, en estos medios, la velocidad variara en función de la presión, y sobre todo de la temperatura. Es igual al producto entre la frecuencia y la longitud de onda.

Velocidad máxima de vibración (v): Es la velocidad propia de la partícula en su movimiento oscilatorio.

Presión acústica (p): En los puntos de gran densidad de partículas, la presión es mayor que la normal, mientras que en las zonas dilatadas es menor.

Fase: Es la condición instantánea dentro de una oscilación. Este concepto se comprende fácilmente cuando se comparan dos oscilaciones distintas, en la que aparece una diferencia de fase.

Atenuación: Es la disminución de la amplitud en una oscilación, en función del tiempo. La atenuación es debida a la suma de la dispersión y la absorción

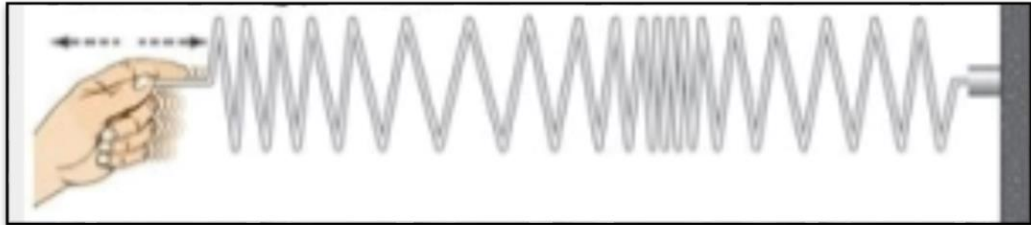
Frente de onda: es el lugar geométrico en que los puntos del medio de propagación son alcanzados en un mismo instante por una determinada onda ya sea que una onda este propagándose por el espacio o sobre una superficie, pueden visualizarse como líneas que se desplazan a través del tiempo alejándose de la fuente sin tocarse.

4.2.TIPOS DE ONDAS Y MODOS DE VIBRACIÓN

Existe una gran variedad de tipos de onda, las ondas más conocidas por su utilización en los ensayos de materiales son:

4.2.1. Onda longitudinal o de compresión. En este tipo de onda, las partículas oscilan en la misma dirección (la vibración de la onda es paralela) que en el sentido de propagación de onda. La fluctuación de las partículas respecto de su posición de equilibrio hace que existan zonas de compresión (partículas muy juntas), y zonas de depresión (partículas muy separadas). En la figura 2 se observa un ejemplo de una onda longitudinal.

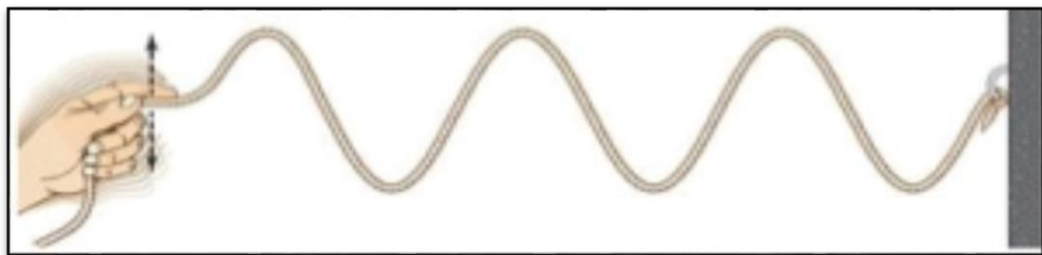
Figura 2. Representación de una onda longitudinal por medio de un resorte, donde puede observarse un movimiento en la misma dirección de la onda, zonas de compresión y zonas de depresión. Figura reproducida de la ref [1].



4.2.2. Onda transversal o de corte. En este tipo de onda, la vibración de las partículas es perpendicular al sentido de propagación, se produce esta vibración al aplicar una fuerza cortante y periódica en el borde de un material.

Esta fuerza cortante se transmite a las partículas de los planos adyacentes, dando lugar a oscilaciones transversales retardadas, según su distancia al plano de excitación. A continuación, en la figura 3 se observa un ejemplo de onda transversal.

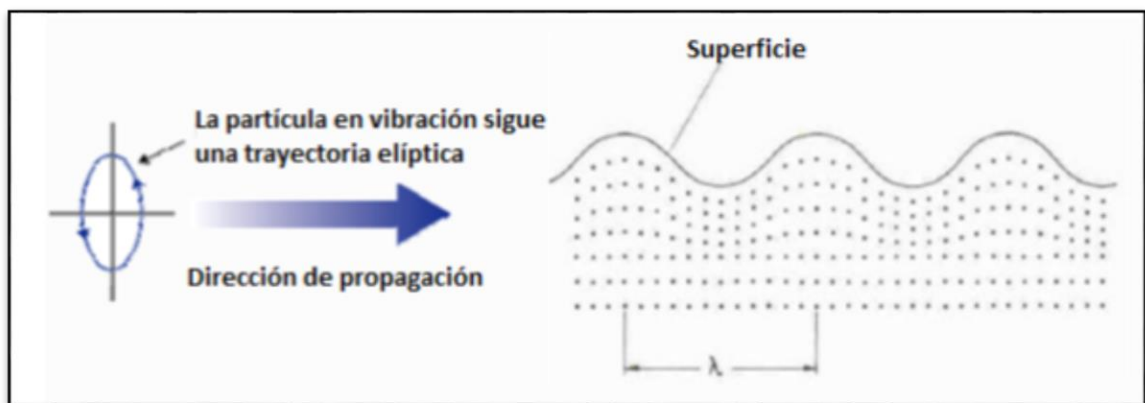
Figura 3. Representación de una onda transversal por medio de un laso donde puede observarse movimiento perpendicular al movimiento de la onda. Figura reproducida de la ref [1].



4.2.3. Ondas superficiales o de Rayleigh. Son un tipo especial de onda transversales que se transmiten a lo largo de la superficie de un material. Se propagan sobre la superficie de materiales normalmente de espesores gruesos con una penetración equivalente a una longitud de onda. El movimiento de las partículas forma una elipse siendo esta una combinación de

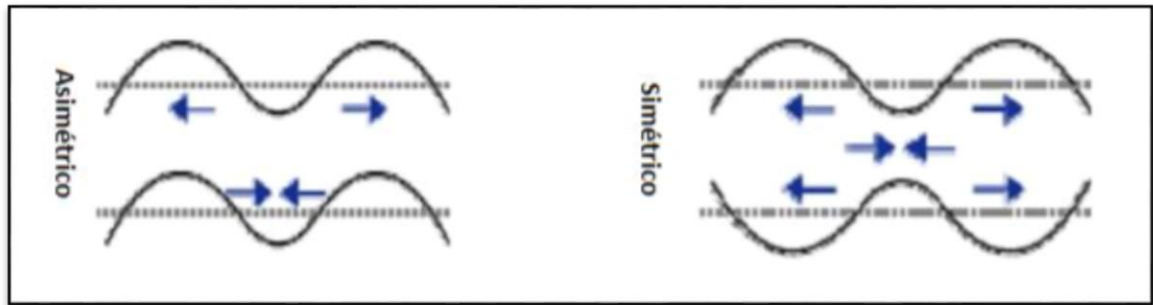
ondas transversales y longitudinales donde el eje de mayor longitud es perpendicular a la dirección de propagación de la onda. Estas ondas son utilizadas en el método de ultrasonido porque son particularmente sensibles a defectos en la superficie siendo capaz de copiar las posibles curvas que dichas superficies posean. En la figura 4 se puede apreciar este tipo de onda.

Figura 4. Descripción del movimiento elíptico de las partículas en vibración con una dirección de propagación sobre una superficie. Figura reproducida de la ref [1].



4.2.4. Ondas Lamb. Este tipo de ondas aparecen en cuerpos planos de espesores delgados como las placas. Estas se propagan paralelas a la superficie a través de todo el material, solo se generan para determinadas condiciones del ángulo de incidencia, frecuencia y espesor de placa. El movimiento de las partículas genera dos modos principales de vibración; modo simétrico o extensional (moviéndose paralelas a la superficie respecto al plano medio) y el anti simétrico o flexional (el mayor movimiento de las partículas es perpendicular a la superficie), en la figura 5 se observa el ejemplo de ondas Lamb por cada modo de vibración.

Figura 5. Representación de ondas Lamb por vibraciones asimétricas y vibraciones simétricas. Figura reproducida de la ref [1].



4.2.5. Impedancia acústica (z). La impedancia acústica es la relación entre la presión acústica y la velocidad máxima de vibración de las partículas. También suele denominarse como la resistencia que se opone a la vibración de las partículas.

Dependiendo del mayor o menor valor de la impedancia del medio se dividen: en acústicamente duros, cuando sus elementos de masa varían muy poco su velocidad de vibración a pesar de una gran diferencia de presión; acústicamente blandos, cuando con pequeña diferencia de presión en sus partículas vibran a gran velocidad.

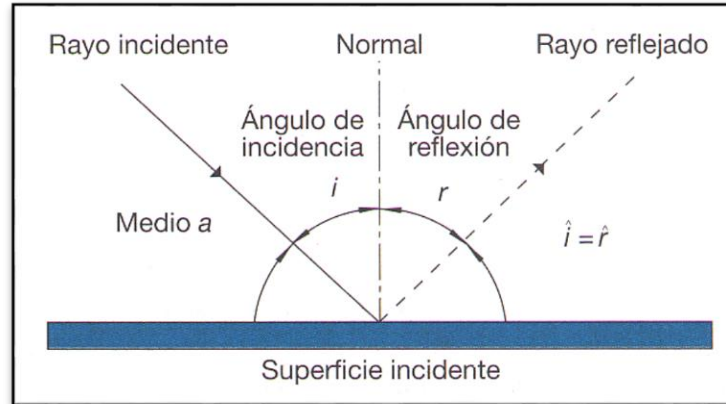
Debido a las anteriores definiciones puede parecer que las propagaciones de las ondas serán peor en un material acústicamente duro, que en uno blando, no siendo así, ya que la impedancia acústica se opone a la vibración de las partículas, pero no a la propagación de la onda.

4.3. TRANSMISIÓN Y DESCOMPOSICIÓN DE ONDAS

Las ondas sonoras dentro de un medio pueden sufrir las siguientes transmisiones o descomposiciones:

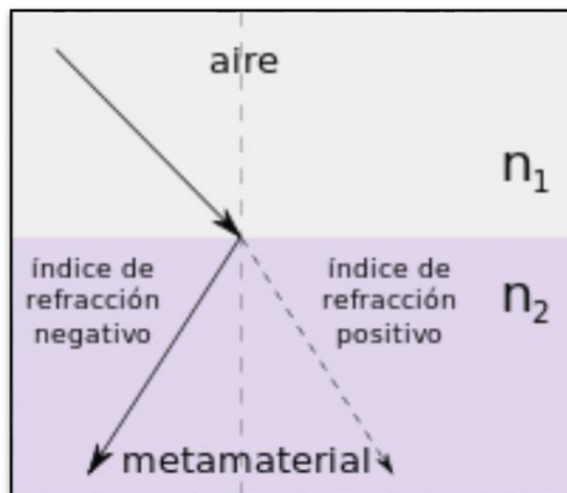
Reflexión: Al incidir una onda sobre una superficie de propiedades elásticas distintas al medio en que se propaga, parte de su energía es reflejada por esa superficie en la dirección que forma, con la normal a la superficie el mismo ángulo que la onda incidente. En la figura 6 se observa el fenómeno de reflexión en las ondas.

Figura 6. Descripción del fenómeno de reflexión a través de una superficie de incidencia. Figura reproducida de la ref [1].



Refracción: La energía de la onda que no fue reflejada penetra en el segundo medio con dirección distinta al de la onda incidente, pero tal que la relación entre los senos de los ángulos respecto a la normal sea constante. En la figura 7 se observa el fenómeno de refracción en las ondas.

Figura 7. Descripción del fenómeno de refracción de una onda que cambia de medio. Figura reproducida de la ref [1].



La ley de Snell: Relaciona el ángulo de la onda incidente con el de la onda refractada directamente con las velocidades del sonido en ambos medios.

$$\frac{\text{sen } \alpha_1}{\text{sen } \alpha_2} = \frac{C_1}{C_2}$$

Donde:

α_1 : Ángulo de incidencia de la onda incidente.

α_2 : Ángulo de incidencia de la onda refractada.

C_1 : Velocidad del sonido en el medio de la onda incidente.

C_2 : Velocidad del sonido en el medio de la onda refractada.

Difracción: Es el fenómeno por el cual una onda que incide en un cuerpo pequeño o una abertura se distorsiona y se propaga en todas las direcciones detrás de dicho orificio.

4.4.GENERACIÓN Y RECEPCIÓN DE LAS ONDAS ULTRASÓNICAS

Cuando se busca emplear la técnica de ultrasonido en END es necesario emplear una serie de mecanismos y equipos ya definidos para obtener los resultados deseados. El concepto básico es la transformación de pulsos eléctricos en vibraciones mecánicas y el retorno de vibraciones mecánicas a energía eléctrica. Para ello se utilizan unos palpadores que generan y reciben señales ultrasónicas. Esta conversión de energía se puede realizar mediante fenómenos físicos que se utilizan para la generación y recepción de las ondas ultrasónicas, las dos más utilizadas son:

- **Efecto piezoeléctrico o piezoelectricidad:** El efecto piezoeléctrico es comúnmente utilizado para ensayos no destructivos de los materiales. Podemos definir un material piezoeléctrico como todo aquel capaz de convertir deformaciones mecánicas procedentes de una presión externa en cargas eléctricas; los elementos utilizados son una pieza de

material polarizado, en una parte las moléculas están cargadas positivamente y en la otra parte negativamente. La pieza del material piezoeléctrico va conectado a un electrodo en cada una de sus caras opuestas, así cuando se aplica un campo eléctrico a lo largo del material las moléculas polarizadas se alinean con el campo formando un dipolo inducido en la estructura cristalina. Esta alineación de las moléculas causara un cambio dimensional llamado electrostricción. A su vez puede ocurrir el efecto contrario, que se provoque un campo eléctrico tras una modificación dimensional. Generalmente el espesor del elemento activo utilizado es determinado por la frecuencia en la que se utiliza el transductor, cuanto más alta son las frecuencias requeridas, más delgados serán los cristales utilizados.

- **Efecto magnetostrictivo o magnetostricción:** El efecto magnetostrictivo consiste en aprovechar la propiedad que tienen algunos materiales ferromagnéticos; principalmente se utiliza Níquel y Acero, que se caracterizan por contraerse o expandirse en determinada dirección cuando están sometidos a la influencia de campos magnéticos en condiciones especiales. Este efecto es recíproco, lo cual permite a su vez emisión y recepción de las ondas ultrasónicas. Estos materiales están compuestos por un gran número de moléculas que deben ser polarizadas y se deformarán mecánicamente cuando se les aplique un voltaje. A medida que se les aplica una diferencia de potencial, las moléculas pasaran de estar orientadas aleatoriamente, a obtener una orientación según el campo aplicado, la carga aplicada es alterna y volverá a cero, aumentando y disminuyendo así su tamaño y produciendo con ello las vibraciones.

Entre los materiales más conocidos en la utilización de cristales para los transductores se encuentran los siguientes:

- **Cuarzo:** Fue el primer material utilizado, es transparente y de dureza alta, tiene características muy estables en frecuencia, sin embargo, es pobre en la generación de energía acústica.
- **Cerámicas sintéticas:** Son generadores de energía acústica de alta eficiencia, sin embargo, tienen tendencia al desgaste.

- **Sulfato de litio:** Es muy eficiente como receptor de energía acústica, pero su fragilidad es alta; soluble en agua y su uso es limitado debido a que solo puede trabajar con temperaturas menores de 75° C.

4.5.DEFECTOLOGÍA POR ULTRASONIDO

El ensayo no destructivo por ultrasonido es utilizado para detectar fallas y discontinuidades en un material, este ensayo consiste en introducir un conjunto de ondas de alta frecuencia a dicho material, estas ondas se propagan a través del material y cuando estas se encuentran con un medio de propagación distinto una parte de estas es reflejada; el grado de reflexión depende en parte del estado físico de los materiales que forman la interface, es decir que si el haz ultrasónico pasa de un medio solido a uno gaseoso la reflexión de este será prácticamente total facilitando la detección de grietas, laminaciones, poros, socavados y otras discontinuidades; en el caso de que la onda pase de un medio solido a otro en el mismo estado la reflexión de esta será parcial generando una respuesta de menor energía pero de igual manera detectable.

4.6.PALPADORES

Es la parte más importante del instrumento de ultrasonido, en este se da la transformación de energía eléctrica a mecánica y viceversa, existen diferentes tipos de palpadores los cuales según su construcción obtendrán un comportamiento diferente. La elección de uno u otro depende de la frecuencia y ancho de banda utilizados así como de la estructura a analizar.

El haz ultrasónico generado por un palpador en forma de disco, es similar a un haz de luz, el cual es propagado en forma de cono. Generalmente este haz se considera constante en toda su longitud, pero al medir las intensidades a lo largo de éste podemos distinguir tres zonas.

- **Zona muerta:** En esta zona se hace muy difícil encontrar discontinuidades o defectos en el material, esto se debe a las interferencias producidas por las vibraciones del cristal ya que las ondas de ultrasonido se generan desde numerosos puntos en el plano del elemento piezoeléctrico. Debido a la zona muerta se produce el primer pico en el escáner de la

probeta, con el fin de eliminar esta zona se utilizan elementos separadores en los palpadores que aleja la fuente de ultrasonido de la superficie de la pieza eliminando dicha zona.

- **Zona de campo cercano:** También conocida como zona de Fresnal, en esta zona están las variaciones que presenta el haz ultrasónico debido a los máximos y mínimos que se dan por la presión acústica. Se detectan indicaciones múltiples y con grandes variaciones es por ello que el efecto producido por un haz ultrasónico en esta zona es ignorado o desconocido. Es una zona de fluctuaciones de la intensidad producidas por efectos de los bordes del cristal. Las ondas de presión se convierten en uniformes hacia el final del campo cercano, la distancia del campo cercano está relacionada con el diámetro del palpador y con la longitud de onda del haz ultrasónico.
- **Zona de campo lejano:** también conocida como zona de Fraunhofer, en esta zona, la intensidad o presión acústica se estabiliza, teniendo mayor magnitud alrededor del eje imaginario del haz, y va disminuyendo hacia los límites del mismo. El ángulo de divergencia depende de varios factores como son el diámetro y frecuencia del palpador, así como de la velocidad acústica del medio transmisor.

4.6.1. Tipos de palpadores.

- **Palpador de haz angular:** Utilizan una interface en forma de cuña la cual genera un ángulo entre el haz emitido y la normal a la superficie analizada. Esto introduce ondas refractadas de corte en el material al mismo tiempo que dichas ondas son reflejadas en las paredes de la pieza mejorando la detección de imperfecciones. También son utilizados para generar ondas de superficie que permiten encontrar defectos superficiales o subsuperficiales. Pueden ser adquiridos con diferentes ángulos, fijos o en versiones ajustables, hay que prestar especial atención con los que poseen ángulos fijos debido a que el ángulo de refracción de la onda cambiará según el material utilizado. Pueden ser de dos tipos: como una unidad integral o desmontable (palpador de haz recto y zapata).

- **Palpador de contacto:** Los palpadores de contacto son los palpadores comunes de 0° y resultan idóneos para inspeccionar materiales grandes de geometría sencilla, el transductor de contacto se sitúa verticalmente sobre la superficie para detectar fallas en el material sometido a la inspección, utilizando un medio de acople para que puedan ser transmitidas las ondas ultrasónicas. Este consta de un elemento de cristal sencillo alojado dentro de una carcasa, el mismo cristal transmite y recibe la energía sonora. Estos palpadores generan un retardo de tiempo entre la generación de la onda de sonido y la llegada de la onda reflejada mejorando la lectura en las zonas cercanas a la superficie del material. Esto los hace especiales para el uso en medición de espesores con gran precisión y verificación de laminación en materiales compuestos. Los palpadores se seleccionan por frecuencia y tamaño del cristal, la frecuencia del palpador adecuado se determina por el tipo de material y por la gama de espesores esperada. Las opciones de tamaño del cristal y de ángulo de la cuña se determinan por el acceso, la forma y el acabado de la superficie del objeto sometido a medición.

- **Palpador de inmersión:** La transmisión del ultrasonido desde el palpador a la pieza que se encuentra en modo de prueba se realiza a través de una columna de líquido, es decir, sin que exista contacto directo, presión no rozamiento entre el palpador y la pieza. Se puede adquirir con un haz plano o un foco cilíndrico dependiendo de la utilidad o la ventaja que poseen los cabezales con focos que mejoran la sensibilidad y la resolución axial al concentrar la energía del sonido en una pequeña área. Estos palpadores se utilizan especialmente cuando se requiere analizar probetas de gran volumen, examinar lotes de gran número de muestras o de formas complejas. Se permite emplear frecuencias más altas, cristales con espesores más finos que las utilizadas con palpadores de contacto directo.

- **Palpador normal de un solo cristal:** Este tipo de palpador contiene un solo cristal piezoeléctrico que realiza las funciones de emisor y receptor, sus características son similares a los palpadores de contacto mencionados anteriormente. También podemos encontrar palpadores tipo dual o de doble cristal.

4.6.2. Partes del palpador. El palpador consta de varias partes que hacen posible la emisión y recepción de las ondas ultrasónicas. El palpador se compone de:

- **Material piezoeléctrico:** Es el elemento activo, el cristal, este puede ser de diferentes tipos según el tipo de análisis que se vaya a realizar. Para obtener la mayor energía de salida posible se coloca una lámina de $1/4$ de la longitud de onda con una impedancia determinada entre la cara del cabezal y el cristal piezoeléctrico. Esta lámina genera que todas las ondas que salen del cabezal lo hagan en fase. Los cabezales de contacto incluyen una lámina que protege los elementos internos de ralladuras.
- **Electrodos:** Conductor eléctrico a través del cual puede entrar o salir una corriente eléctrica en contacto con el material piezoeléctrico.
- **Material de apoyo de amortiguación:** Este material tiene gran influencia en el amortiguamiento del transductor, debe tener una impedancia similar a la del material piezoeléctrico para producir un amortiguamiento lo más eficiente posible, por lo que el cabezal tendrá un ancho de banda de trabajo más amplio y una mejor sensibilidad. Cuando la diferencia de impedancia entre ambos materiales aumenta, la penetración aumenta, pero la sensibilidad disminuye. Los cabezales están contruidos para soportar cierto maltrato, pero se recomienda manipularlos con cuidado ya que un mal uso como golpes pueden quebrar la lámina de protección o el material de apoyo, y ante cualquier daño de estos dos últimos elementos se puede presentar una lectura errónea en el análisis de ultrasonido.

4.7.ACOPLANTES

Cuando la inspección es por contacto directo se requiere del uso de acoplantes especiales necesarios para transmitir las ondas ultrasónicas desde el transductor a las superficies del material en estudio, además de eliminar el oxígeno entre la pieza y el palpador.

Todos los acoplantes deben cumplir una serie de requisitos, como son:

- Proporcionar un acoplamiento acústico positivo para una prueba confiable.

- Lubricar la superficie de la pieza y la cara del transductor, excluyendo el aire entre ellas.
- Que pueda ser fácilmente aplicado.

5. TÉCNICA PHASED ARRAY

El Phased Array es una técnica de inspección por ultrasonido computarizada de última generación que deja registro y tiene alta probabilidad de detección, alta precisión en la evaluación de defectos y repetitividad garantizada. Los principios físicos de funcionamiento son similares ultrasonido convencional pulso-eco, con la diferencia que se pueden controlar parámetros mediante software como: Angulo de refracción, punto de salida del haz, enfoque en una zona determinada, entre otros.

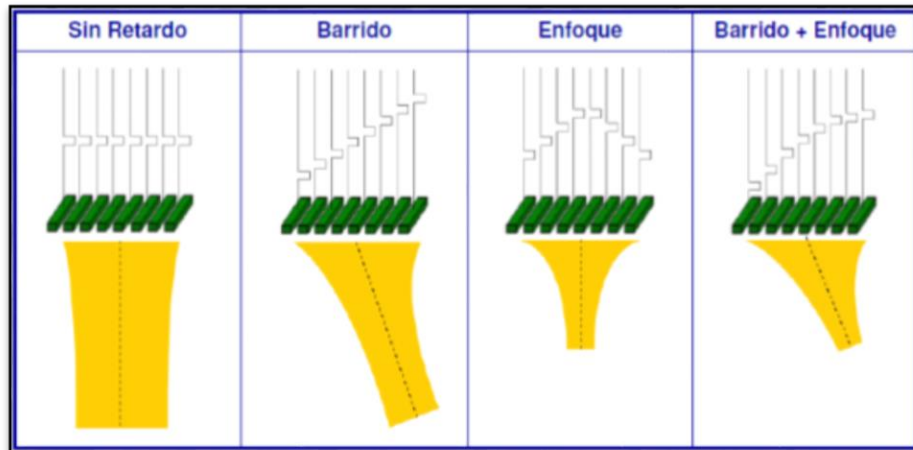
En el sentido más básico un arreglo de fases (Phased Array) utiliza los principios físicos de la onda de corte o presión, de tal manera que una serie de pulsos ultrasónicos genera un frente de onda lineal o sectorial, excitando los elementos a diferente tiempo (delay), dichos pulsos ultrasónicos se reflejaran si encuentran un punto o área diferente al material base y serán captados por los elementos en su tiempo de entrada.

5.1.FORMACIÓN DEL HAZ ULTRASÓNICO

Si se varía el tiempo de retardo de cada elemento piezoeléctrico se pueden obtener diferentes formas del haz ultrasónico utilizando un mismo transductor.

Dentro del método de ultrasonido Phased Array tenemos diferentes modos de barridos electrónicos como lo son el barrido sectorial que permite un barrido por rango de ángulos que van desde los 30° hasta los 70° y un barrido lineal que permite un barrido electrónico en una banda de ángulos deseados. En la figura 8 se observa los diferentes modos de barridos electrónicos.

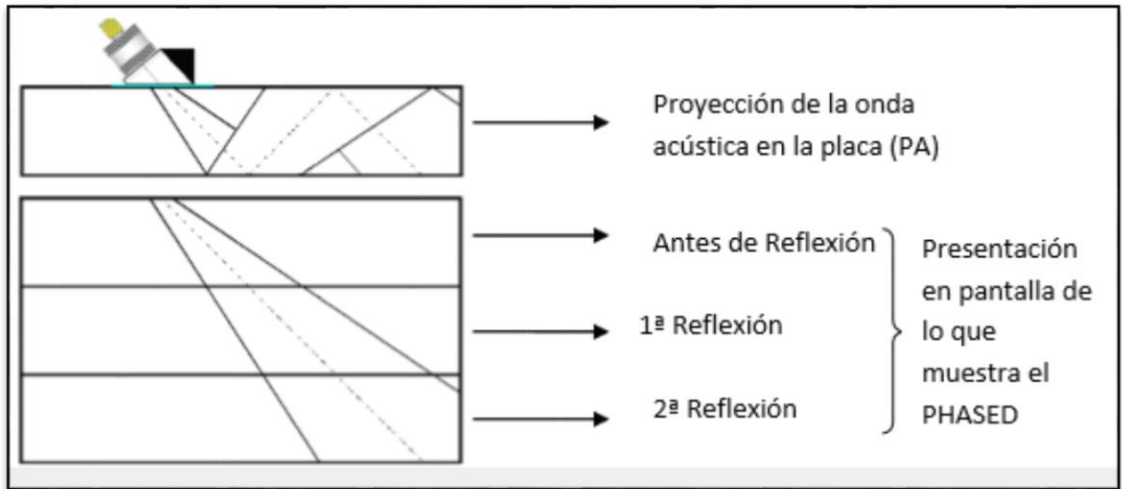
Figura 8. Modos de barridos electrónicos sin retardo, barrido con 30° de inclinación, barrido con enfoque y barrido con enfoque de 30° de inclinación. Figura modificada y reproducida de la ref [1].



5.2.REFLEXIÓN DE LA ONDA EN PHASED ARRAY

La reflexión de la onda acústica en modo Phased Array corresponden a las proyecciones del haz, estas salen desde el palpador y continúan hasta reflejarse, ya sea con el fondo del material a inspeccionar o con alguna discontinuidad ubicada dentro del volumen del material. En la figura 9 se puede observar una esquematización de lo que ocurre realmente en la inspección y lo que muestra la pantalla en modo Phased Array.

Figura 9. Presentación grafica de lo que muestra en pantalla del equipo la inspección por Phased Array por la proyección de la onda acústica sobre una placa. Figura modificada y reproducida de la ref [1].



6. METODOLOGÍA

En el presente proyecto se realizó la visita y aplicación del END Phased Array a diferentes tramos de tuberías de perforación, en la compañía GENERAL X RAY LTDA, quienes prestan servicios integrales técnicos de END a la industria aeronáutica de acuerdo con los estándares AWS, ASME, ASTM y API.

En la aplicación del ensayo se identificó el funcionamiento del equipo y posteriormente un análisis de las ventajas y desventajas con respecto a los END convencionales. Dentro de su desarrollo se encontraron algunas indicaciones en las tuberías, corroborando la efectividad del fácil manejo operacional y ahorro de tiempo que implica inspeccionar piezas con esta técnica.

6.1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

En el proceso de investigación del proyecto se revisaron libros, tesis de grado y artículos de investigación, donde se haya estudiado y profundizado los temas afines: fallos en tuberías de perforación, ensayos no destructivos y Phased Array. Además se contó con acompañamiento de la compañía GENERAL X RAY LTDA, la cual facilitó sus instalaciones y personal, brindando así conocimientos y resultados más sólidos.

6.2. DESARROLLO INVESTIGATIVO

Inicialmente del libro de la compañía Olympus, "Introduction To Phased Array Ultrasonic Technology Applications", se encontraron los conceptos básicos como los principales componentes, los tipos de inspecciones y aplicaciones de la tecnología Phased Array, con el fin de tener el conocimiento y comprender el funcionamiento operacional de la técnica.

Una vez estudiada esta información, se emprendió la búsqueda de tramos de tuberías de perforación que se tomarían como muestra para aplicar la técnica demostrativa, estos tramos de tubería de perforación fueron adquiridas de la compañía Tuboscol S.A. desde la ciudad de Bogotá DC. En la selección de esas tuberías se tuvieron en cuenta los requisitos de que

contaran con una longitud de 1 metro, las tuberías adquiridas contaran con un OD de 3 ½” y presentarán un estado de desgaste notable.

Obtenidas, se llevaron al laboratorio de END de GENERAL X RAY LTDA ubicado en la ciudad de Barrancabermeja. Dentro del laboratorio se llevó a cabo una charla previa dirigida principalmente a la presentación, seguridad e información de las instalaciones. Posteriormente una descripción, información y recomendaciones sobre los equipos a los que se tendrían acceso para el desarrollo de la prueba.

El equipo utilizado fue un Sonatest VEO 16:64 Phased Array de cuarta generación, familiarizados con el equipo, se procedió a identificar cada una de las partes que lo componen y las características que este posee. El equipo VEO 16:64 SONATEST es un detector de defectos por ultrasonidos con la capacidad de detección de los ultrasonidos con el modo de representación Phased Array. Este equipo cuenta con avanzadas herramientas de software que facilitan la detección y clasificación de fallas y discontinuidades según las principales normas vigentes. Este equipo también se caracteriza por ser portátil y resistente, lo que facilita su uso en distintos lugares y al descubierto, ya que posee resistencia al polvo, golpes y la lluvia. A continuación, en la figura 10 se puede observar el equipo Sonatest VEO 16:64 Phased Array y cada una de sus partes.

Figura 10. Equipo Phased Arrey Sonatest VEO 16:64 y componentes del equipo: a) Vista frontal del equipo donde se encuentra su software de funcionamiento, pantalla, panel de botones y distintos conectores. b) Vista lateral izquierda donde se observa conectores para carga, USB y memorias de almacenamiento externo. c) Vista lateral derecha donde se observa diferentes conectores para palpadores/receptores. d) Conector del elemento piezoeléctrico. e) Elemento piezoeléctrico de 16:64. f) Palpador lineal de forma rectangular de cuarzo. Figuras realizadas por los autores.

a)



b)



c)

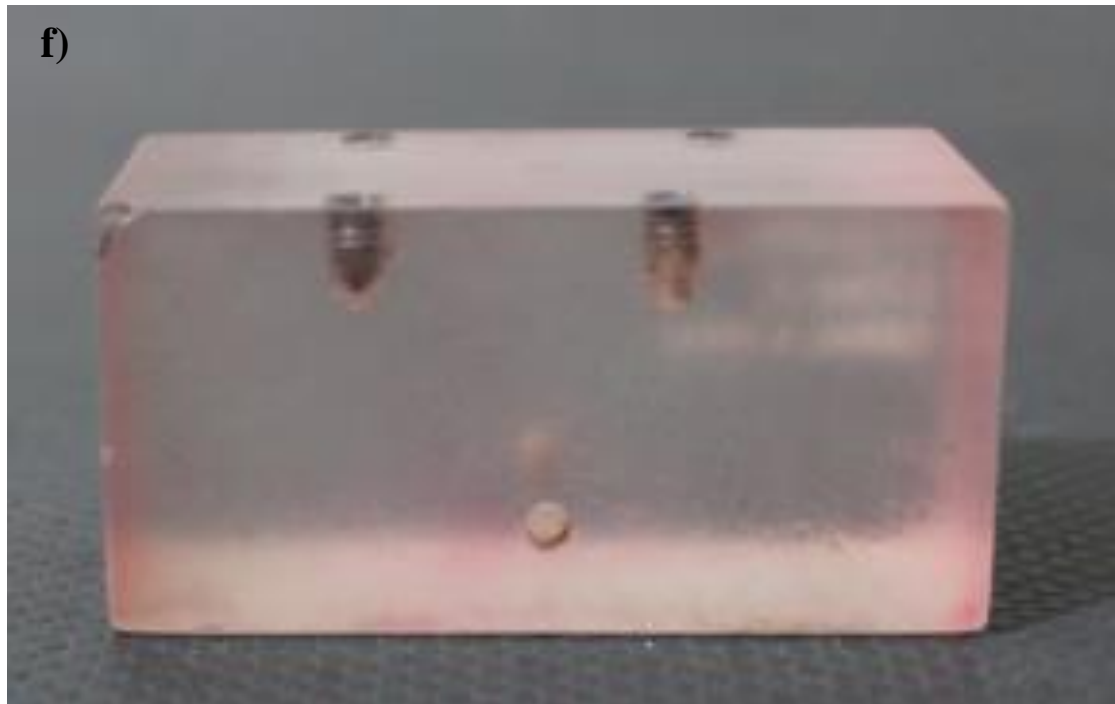


d)



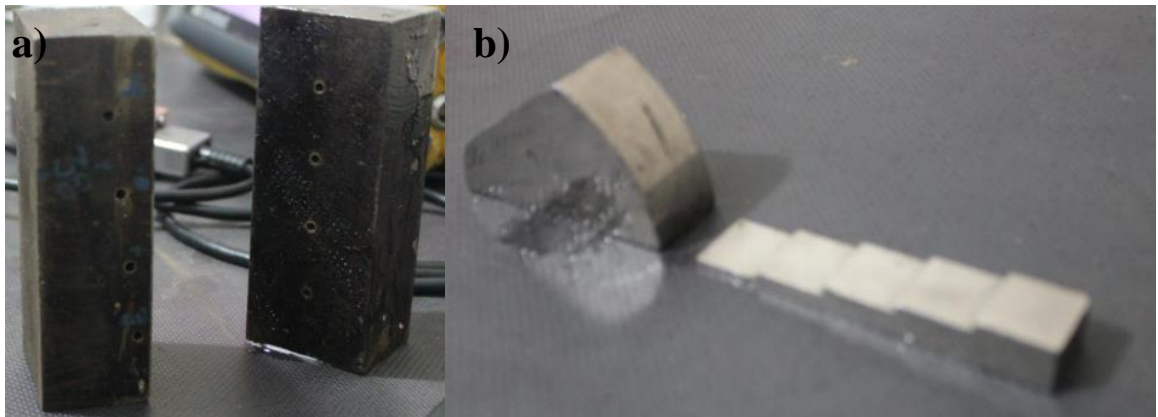
e)





Se dio inicio a la aplicación del ensayo con la calibración del equipo por medio de unos bloques de calibración, este proceso consiste en inspeccionar el bloque de calibración para establecer la velocidad de propagación del sonido en el medio y definir los ajustes del emisor y del receptor, esto con el fin de crear imágenes nítidas en las inspecciones a realizar con el equipo. En la figura 11 se aprecian los bloques utilizados para la calibración del equipo.

Figura 11. a) Bloques rectangulares de calibración de acero para inspecciones de defectologías. b) Bloques de calibración de acero para inspecciones de espesores de pared. Figuras realizadas por los autores.



Finalizado el proceso de calibración, se realiza una inspección visual sobre los tramos de tuberías de perforación y así mismo una limpieza superficial (ver figura 12), esto con el objetivo de retirar rastros significativos de contaminantes que puedan alterar de una u otra forma su inspección y para determinar la condición superficial de estas.

Figura 12. a) Inspección visual a tramo de tubería de perforación con OD de 3 ½". b) Area establecida para inspeccionar cualquier tipo de defectología en tubería de perforación con OD de 3 ½". Figuras realizadas por los autores.



Prosiguiendo con el desarrollo del ensayo es necesario el uso de un acoplante que cumpla con los requisitos de proporcionar un acoplamiento acústico positivo, lubricar la superficie de la pieza y la cara del palpador excluyendo el aire entre ellos y que pueda ser fácilmente aplicado para una prueba confiable. En este caso se determinó el uso de Glicerina como

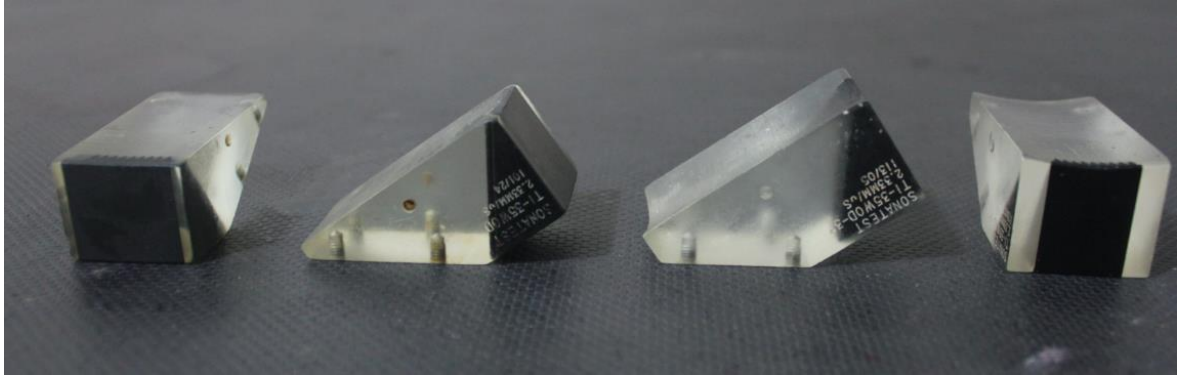
acoplante (ver figura 13), aplicándolo directamente en el tramo de tubería de perforación a inspeccionar.

Figura 13. a) Determinación de Glicerina para uso como acoplante de la inspección. b) Aplicación del acoplante directamente en la zona a inspeccionar en tubería de perforación con OD de 3 ½". Figuras realizadas por los autores.



Antes de empezar a inspeccionar las muestras, debe escogerse el palpador que mejor se adecue a la geometría superficial de los tramos de tuberías de perforación, en este caso, un palpador para superficies cilíndricas. La compañía dispuso de palpadores de cuarzo con neopreno como material de apoyo de amortiguación (ver figura 14), generando características muy estables en frecuencia y generación de energía acústica.

Figura 14. Palpadores para diferentes geometrías de superficies a inspeccionar con material de apoyo de amortiguación de neopreno. Figuras realizadas por los autores.



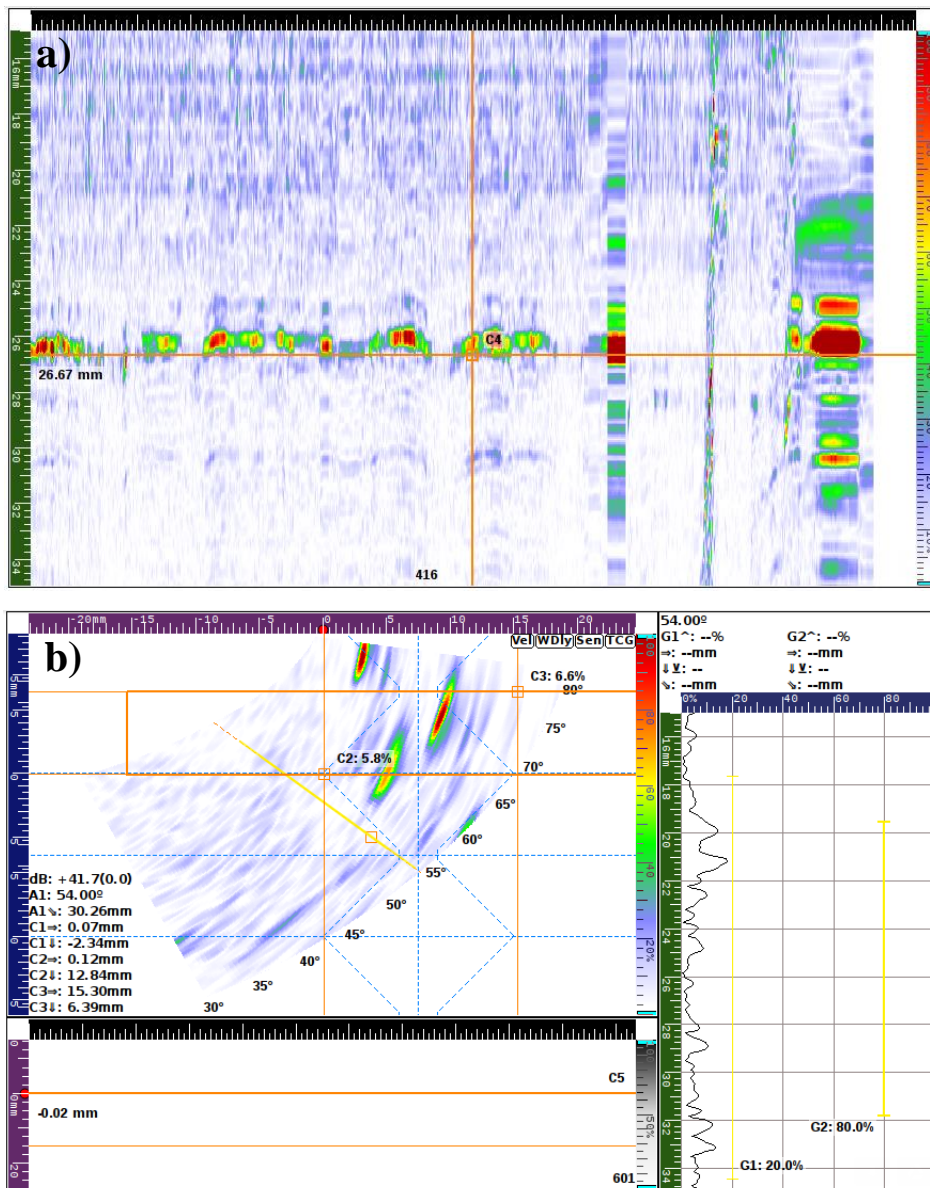
Se empieza la inspección de las zonas seleccionadas de los tramos de tuberías (identificadas durante la inspección visual) ubicando el palpador sobre las áreas donde inicialmente se aplicó el acoplante (ver figura 15), generando indicaciones en la pantalla del equipo en tiempo real. Estas indicaciones brindan información acerca de discontinuidades o fallos presentes en la muestra.

Figura 15. a) Proceso de inspección de la técnica Phased Array a tramo de tubería de perforación con OD de 3 ½”, utilizando palpador para superficies cilíndricas. b) Proceso de barrido sectorial en tramo de tubería de perforación con OD de 3 ½”. c) Indicaciones sub-superficiales halladas en los instantes que el palpador estuvo en contacto al tramo de tubería de perforación de Od de 3 ½”. Figuras realizadas por los autores.



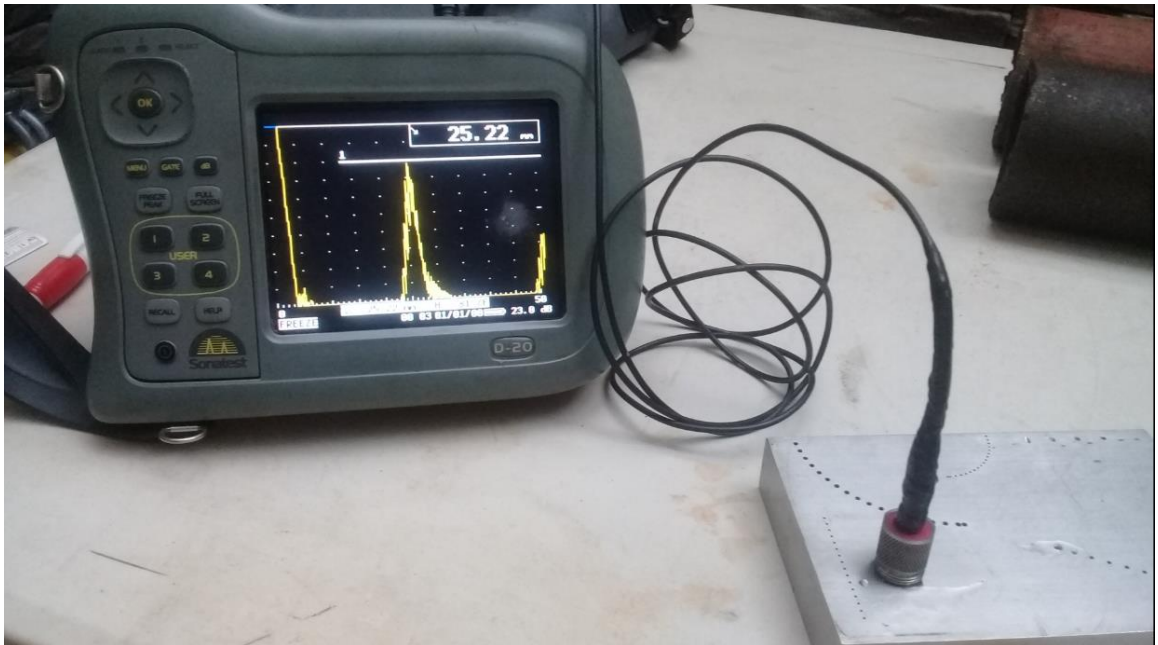
El equipo de Phased Array tiene la capacidad de almacenar la información generada a lo largo de la inspección, además de contar con múltiples opciones para compartir por medio de Puertos USB, Infrarrojo, Bluetooth, etc. También es posible elegir el tipo de formato en el que se desea generar dicha información, PDF, HTML o en un Documento en Word (ver figura 16), teniendo un acceso sencillo finalizando así la inspección la cual duro alrededor de 5 minutos.

Figura 16. a) Registro en archivo PDF de la inspección lineal en busca de defectologías sub-superficiales con el equipo Sonatest VEO 16:64 Phased Array sobre tramo de tubería de perforación con OD de 3 ½". b) Registro en archivo PDF de la inspección sectorial en busca de defectologías sub-superficiales con el equipo Sonatest VEO 16:64 Phased Array sobre tramo de tubería de perforación con OD de 3 ½". Figuras tomadas del registro de inspección del equipo Phased Array, ver anexo A.



Con el objetivo de comparar la tecnología de Phased Array con las técnicas convencionales Se prosiguió a inspeccionar los mismos tramos de tubería de perforación con una técnica de ultrasonido convencional. El equipo utilizado para esta inspección fue Sonatest D20 Scan A (ver figura 17), esta prueba de ultrasonido convencional consto de un tiempo de inspección de 3 horas para realizar las imágenes de inspección Scan A y la verificación de indicaciones de forma individual.

Figura 17. Equipo Sonatest D20 Scan A ultrasonido convencional, en proceso de calibración para la inspección de los tramos de tuberías de perforación. Figura realizada por los autores.



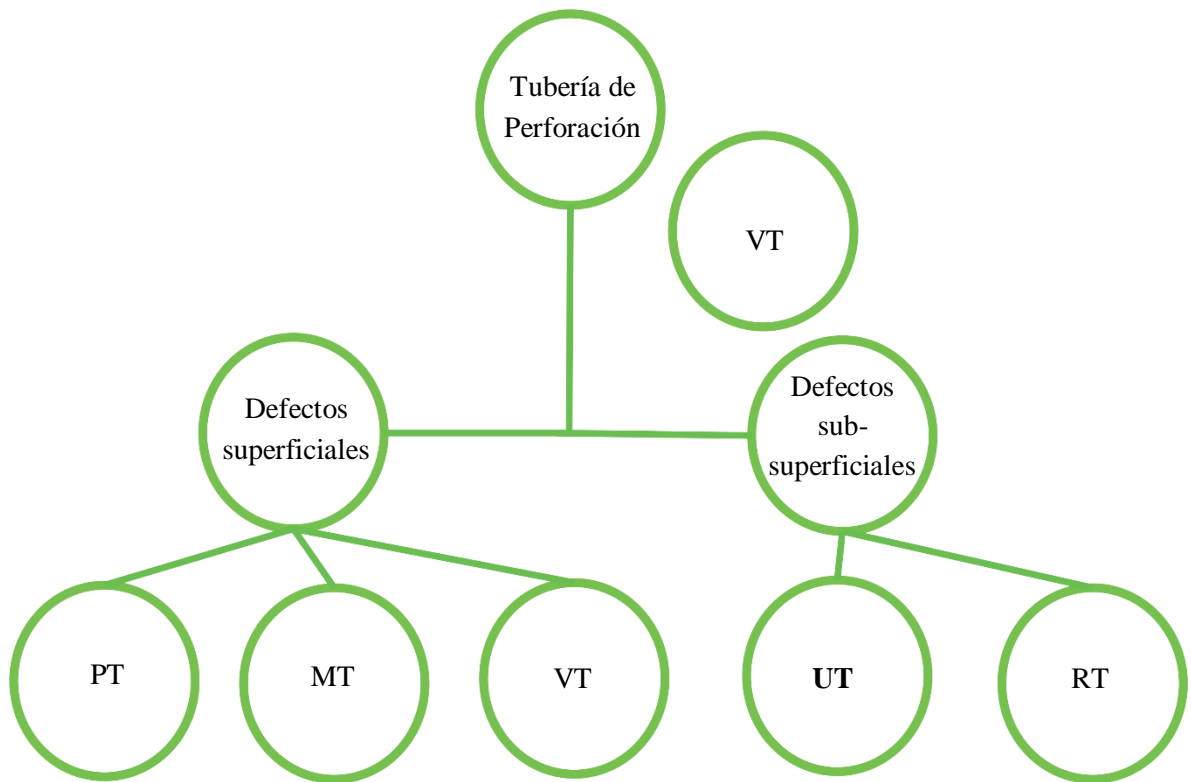
7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Después de realizar las pruebas del END Phased Array y exponer los tramos de tuberías de perforación a una serie de inspecciones con esta tecnología, se establecieron varios análisis de resultados sobre las ventajas y desventajas que predominan en el método y en como a nosotros como ingenieros de petróleos nos beneficia el tener conocimiento de estas tecnologías y de próximas que están por venir.

Los análisis inician en primera instancia con la decisión de realizar una inspección por END a una muestra y posteriormente realizar un examen visual, que cumple la función de protoensayo; es decir, una inspección preliminar a cualquier otro. Es importante conocer la secuencia de cómo llegar a la toma de decisión para el desarrollo de la prueba, que tendrán una optimización significativa en términos de procesos y tiempo que dentro de la industria representa a su vez dinero.

Esta secuencia continua según el diagnóstico preliminar que deja la inspección visual realizada en la muestra, especificando si hay dudas sobre el estado superficial o sub-superficial de esta misma. Una vez identificado esto, se selecciona el END que mejor se adecue con los requerimientos para llevar acabo la inspección. A continuación, la figura 18 muestra el uso de los END con respecto al tipo de defectología a inspeccionar.

Figura 18. Cuadro de jerarquía de los END con respecto al tipo de defecto o discontinuidad en una inspección. Figuras realizadas por los autores.



El método de ultrasonido mediante la técnica de Phased Array ofrece significativas ventajas y algunas desventajas, entre las que se pueden destacar en la Tabla 1:

Tabla 1. Ventajas y desventajas de la tecnología Phased Array en la caracterización, inspección y uso de medición. Realizado por los autores.

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Velocidad, debido a la capacidad de exploración, la técnica Phased Array tiene un tiempo de respuesta casi inmediato, puesto a que en las inspecciones es posible ver en tiempo real las indicaciones en el equipo 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Costo, el precio de los equipos que realizan este tipo de pruebas es considerable, al igual que sus accesorios. ➤ Personal, requiere de personas totalmente capacitadas en el uso de

<p>mientras esta se lleva acabo y reduciendo drásticamente los tiempos en procesos de inspecciones, aumenta la velocidad del examen</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Registro, ya que permite registrar la inspección en el modo más adecuado para su interpretación y evaluación. También dejar a disposición toda la información generada de un proceso de inspección. ➤ Flexibilidad, las características de los equipos en esta tecnología permiten el fácil acceso para desarrollo de sus pruebas en cualquier sitio, permitiendo aumentar las aplicaciones y áreas del ensayo. También realiza una gran variedad de tipos de exploración para la detección de diferentes tipos de defectos o discontinuidades localizados en distintas configuraciones y componentes, permite una inspección simultánea con múltiples ángulos usando un solo palpador; además me permite controlar las características del haz ultrasónico a través de la configuración de las leyes focales. 	<p>los equipos para esta prueba, además de cumplir con nivel II/III en pruebas de ultrasonido.</p>
---	--

<p>➤ Archivo, ya que permite generar un registro de la inspección en diferentes formatos obteniendo el 100% de los datos adquiridos de las señales, pudiendo realizar nuevas evaluaciones en el momento que se requiera en documentos ligeros.</p>	
--	--

De las técnicas aplicadas a los tramos de tuberías de perforación, se realizó un análisis comparativo entre el UT convencional y la técnica Phased Array, con la finalidad de establecer la magnitud cualitativa con la que Phased Array sobresale y saber puntualmente sus características que reafirman la efectividad que tiene su tecnología, en la Tabla 2 se puede apreciar su análisis comparativo.

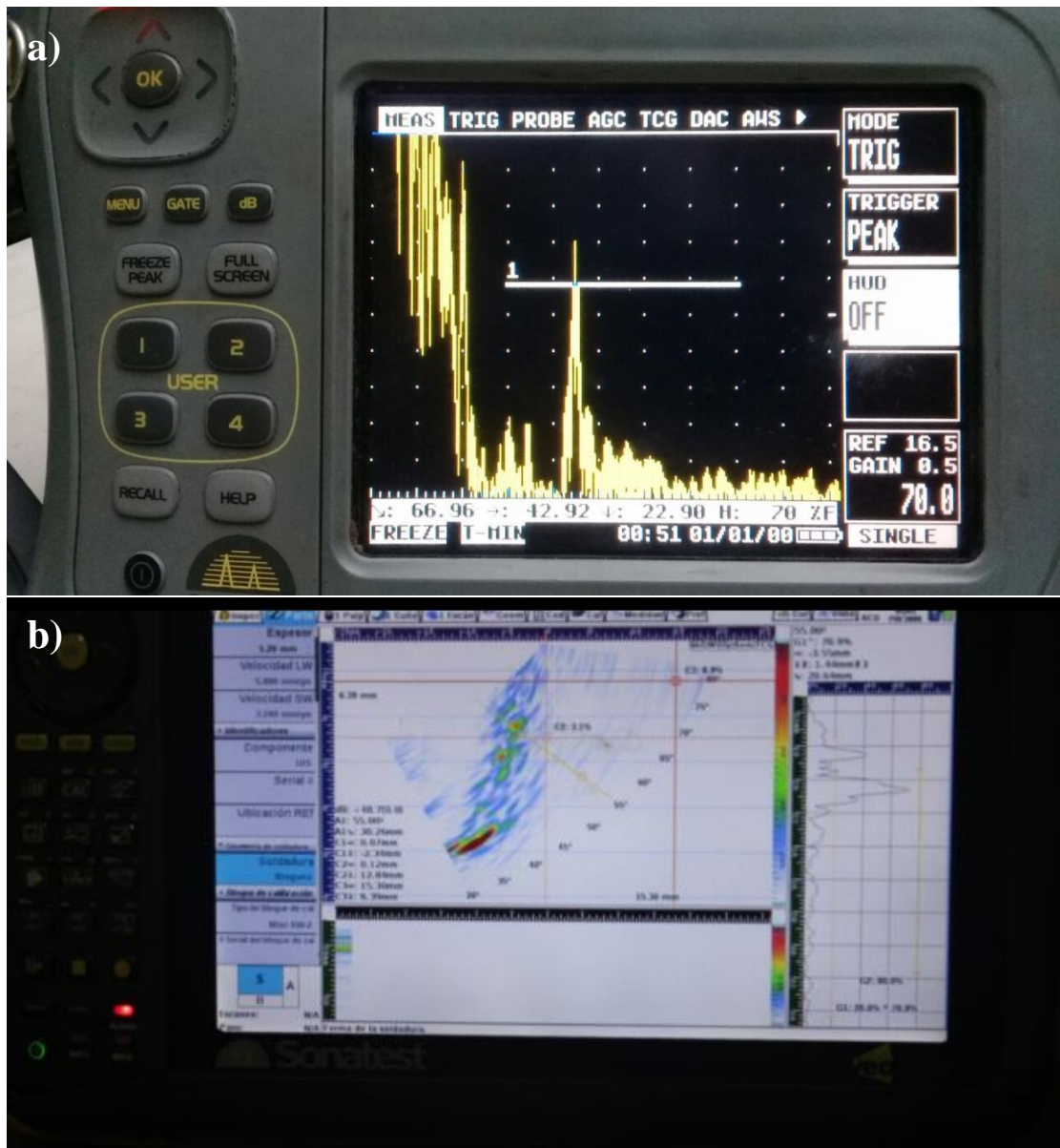
Tabla 2. Análisis comparativo entre la tecnología Phased Array y el END de UT convencional. Realizado por los autores.

PHASED ARRAY	UT CONVENCIONAL
<p>Utiliza varios elementos piezoeléctricos, permitiendo la detección de diferentes tipos de defectos o discontinuidades localizados en distintas configuraciones y componentes en una sola aplicación de la prueba.</p>	<p>Utiliza un solo elemento piezoeléctrico, donde solo permite la detección de un solo defecto y discontinuidad en cada aplicación de la prueba.</p>
<p>Permite una inspección simultánea con múltiples ángulos usando un solo palpador.</p>	<p>Para la inspección por ángulos, se requiere un palpador con las características de ángulo deseado.</p>

<p>Detecta diferentes tipos de defectos y discontinuidades con barridos electrónicos.</p>	<p>La detección de defectos y discontinuidades se basa en la orientación, manipulación y habilidad del especialista.</p>
<p>Los tiempos de inspección pueden durar 15 minutos o menos.</p>	<p>Los tiempos de inspección llevan procesos que generalmente tardan horas y en ocasiones días.</p>

En las figuras 18, se muestra la diferencia durante el proceso de inspección sectorial de uno de los tramos de tubería de perforación con OD de 3 ½”, por la técnica Phased Array y UT convencional. Donde podemos observar que mientras el equipo de UT convencional indica la presencia de una discontinuidad, el equipo de Phased Array indica la presencia cuatro discontinuidades, cabe resaltar que esta inspección se realizó en la misma área del tramo de tubería de perforación.

Figura 19. a) Indicación hallada con el equipo Sonatest D20 Scan A ultrasonido convencional, en el área de interés para la inspección tramo de tubería de perforación. b) Indicaciones halladas con el equipo Phased Arrey Sonatest VEO 16:64, en la misma área de inspección del tramo de tubería de perforación inspeccionada con el equipo Sonatest D20 Scan A ultrasonido convencional. Figuras realizadas por los autores.



De acuerdo con la información registrada en la Tabla 1 y Tabla 2, la técnica Phased Array tiene un alto potencial de ser implementada en las inspecciones de tuberías de perforación, ya que cumple con requisitos específicos como: el fácil acceso y desarrollo en cualquier sitio, inspecciones que no sobrepasan los 5 minutos, veracidad y confiabilidad en la información generada, entre otros, siendo limitaciones que descalifican a los END convencionales.

Finalmente se llega a la construcción teórica de las razones por las cuales Phased Array es una técnica que se debe tener en cuenta en inspecciones de tuberías de perforación, a continuación, en la Tabla 3 se describen las aplicaciones, ventajas y limitaciones que esta técnica evidencio a lo largo del proceso.

Tabla 3. Análisis teórico para la implementación de la técnica Phased Array en tuberías de perforación.

PHASED ARRAY EN TUBERÍAS DE PERFORACIÓN		
Aplicaciones	Ventajas	Limitaciones
<ul style="list-style-type: none"> ➤ El equipo tiene la capacidad de detectar todo tipo de defectos o discontinuidades ya sean superficiales o subsuperficiales en la estructura interna o externa de la tubería de perforación ➤ Permite tener un control y registro de los espesores de pared en la tubería de perforación ➤ Es de gran ayuda dentro de la 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Debido a la capacidad de exploración y el tiempo de respuesta del equipo, permite al operador tomar decisiones de forma rápida y segura en si rechaza o acepta el uso de las tuberías de perforación en la operación. ➤ El equipo Phased Array es un equipo portable y bastante resistente lo cual brinda la oportunidad de trasladarlo 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Es una técnica costosa por lo cual se recomienda hacer un análisis financiero, analizando si el ahorro de tiempo justifica o no la implementación.

caracterización y procesamientos de materiales en la fabricación de las tuberías de perforación	fácilmente a campo para realizar las inspecciones. ➤ permite una inspección simultánea con múltiples ángulos usando un solo palpado, muy útil en las tuberías de perforación donde usualmente se tienen defectos muy cercanos y son de difícil detección con otras técnicas.	
--	---	--

Es importante inspeccionar las tuberías de perforación, puesto a que esto significa detectar y a su vez reducir la cantidad de errores o anomalías, ya que complementa un buen proceso de perforación de un pozo dentro de la industria petrolera.

8. CONCLUSIONES

- Se elaboró una base teórica para los procesos de inspección en tuberías de perforación haciendo énfasis en el rango de aplicaciones, ventajas y limitaciones.
- La técnica Phased Array por su amplio rango de aplicaciones con una baja cantidad de limitaciones, representa un alto potencial para las actividades de inspección, caracterización o medición alcanzando mejorar de manera más precisa la confiabilidad en las tuberías de perforación.
- El desarrollo y aplicación de la técnica Phased Array a tramos de tuberías de perforación evidencian el fácil proceso y las altas velocidades de inspección, generando información precisa y detallada que permite un apoyo en la toma de decisiones de forma más acertada.
- Se hace necesario adquirir destreza en la interpretación de la información generada en la técnica Phased Array, esto va depender en gran medida de la capacitación y certificación de los operadores.

9. RECOMENDACIONES

De acuerdo con los resultados de este estudio, se recomienda que se cuente con un personal profesional y certificado para la aplicación del END, esto con el objetivo de tener veracidad en los resultados.

Para estudios futuros se recomienda:

- Dado que los resultados obtenidos en la presente investigación, y las conclusiones obtenidas a partir de los mismos, solo son aplicables para la tecnología Phased Array, se recomienda indagar y desarrollar trabajos con otras nuevas tecnologías que están llegando al país.
- Realizar análisis técnico financiero para evaluar la viabilidad de un proyecto donde se tenga en cuenta la implementación de esta nueva tecnología en el ámbito de la perforación.
- Elaborar un manual práctico con recomendaciones técnicas, para asumir posibles inconvenientes a la hora en que se realice la prueba.

BIBLIOGRAFÍA

AEND, (Asociación española de Ensayos No Destructivos). Ultrasonidos: nivel II, FC Editorial, 2009.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE: “Damage Mechanisms Affecting Fixed Equipment in the Refining Industry”. API Recommended Practice 571 sixteenth edition, December 1, 1998..

DELOJO, MORCILLO, Gabriel, and (Asociación española de Ensayos No Destructivos) AEND. Inspección visual: niveles II y III, FC Editorial, 2011.

GALVAN PINEDA, Nayeli, Inspección tubular: Complemento de una buena perforación de pozos en la industria petrolera. México, Universidad Nacional Autónoma de México, 2010.

OLYMPUS NDT, Introduction To Phased Array Ultrasonic Technology Applications, Canada, Olympus NDT., 2004.

ANEXO I

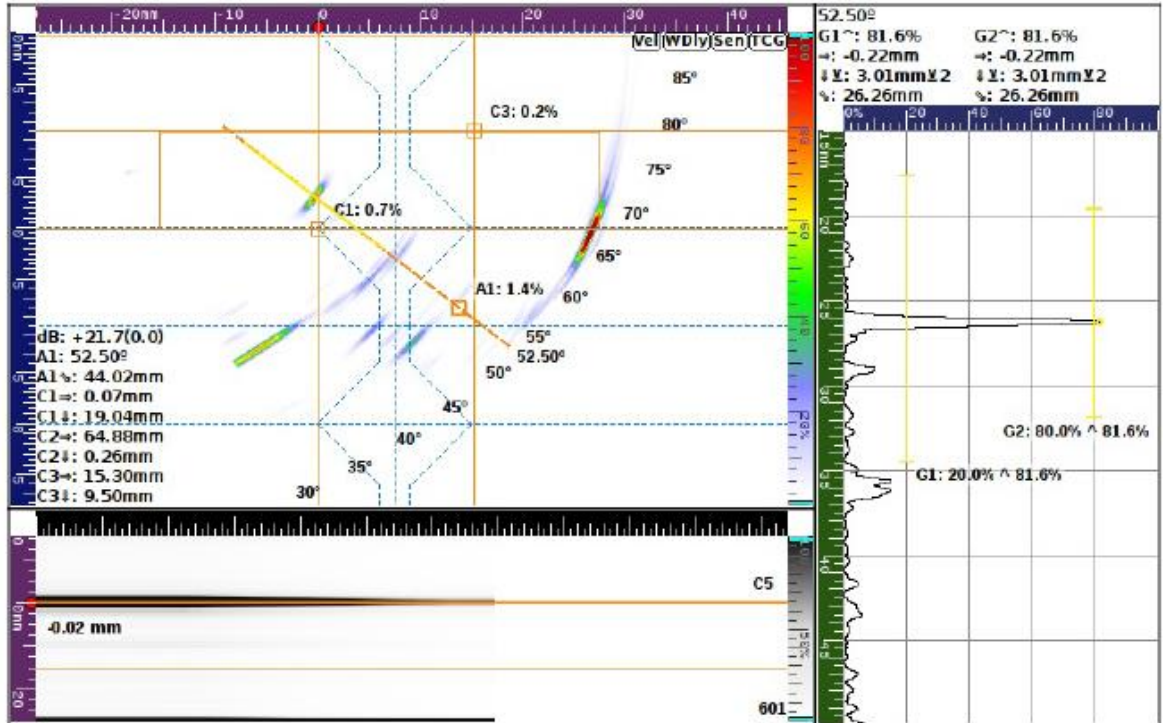


Veo 16:64 Reporte de inspeccion

Software: 3.13.3, Serie de la Unidad #: I005012

Componente	Nombre del archivo de configuración	Archivos Vers.	Operador	Procedimiento Ref	Fecha de Inspección
MORELCO	Example T1-PE-5.0M3E0.8P T1-35W0D-GXR AC.utcfg	10	GXR		2018-03-02 10:31

S2 - Sectorial PE Gain	G1 ^ %FSH	G1 ^ Δ Y	G2 ^ %FSH	G2 ^ Δ Y	G1-G2 ^ %
21.7 dB	81.6%	3.01 mmY2	81.6%	3.01 mmY2	0.00 mm



Leyenda:

Abbr...	Descripción
BPL	Longitud de trayec...
D	Profundidad
DS	Superficie dist.
A	Amplitud
L	Longitud
DLT	Delta

*[Suavizado, Sub-muestreo]

Inspección	Info
Objetivo de la razon del...	M/d
Voltaje Phased Ar.	100 W
Palpador 1 [Freq, Model]	5.00 Mhz, Sonatest-T1-PE-5.0...
Cuña 1 [Velo, Model]	2.330 mm/μs, Sonatest-T1-35...

Información del encoder	
Configuración de codificación	Basado en tiempo
Parte	Info
Material	Acero
Velocidad [LW/SW]	5.890 mm/μs, 3.240 mm/μs
Geometria de parte	Lamina
Espesor	9.50 mm
Soldadura	V sencilla

Barrido/Cursor	Valor1	Valor2	Valor3	Valor4
S1 S-Scan/A1	BPL 44.02 mm	D 26.80 mm	DS 13.87 mm	52.50°
S1 S-Scan/C1	BPL 29.03 mm	D 19.04 mm	DS 0.07 mm	49.00°
S1 S-Scan/C2	BPL 0.00 mm	D 0.26 mm	DS 64.88 mm	0.00°
S1 S-Scan/C3	BPL 33.21 mm	D 9.50 mm	DS 15.30 mm	73.50°
S1 Vista superior/C4	---	---	DS 15.06 mm	S.Eje 749.00 mm
S1 Vista superior/C5	---	---	DS -0.02 mm	S.Eje 600.00 mm
S1 A-Scan/G1	BPL 26.26 mm	D 15.99 mm	DS -0.22 mm	Pico81.6%
S1 A-Scan/G2	BPL 26.26 mm	D 15.99 mm	DS -0.22 mm	Pico81.6%

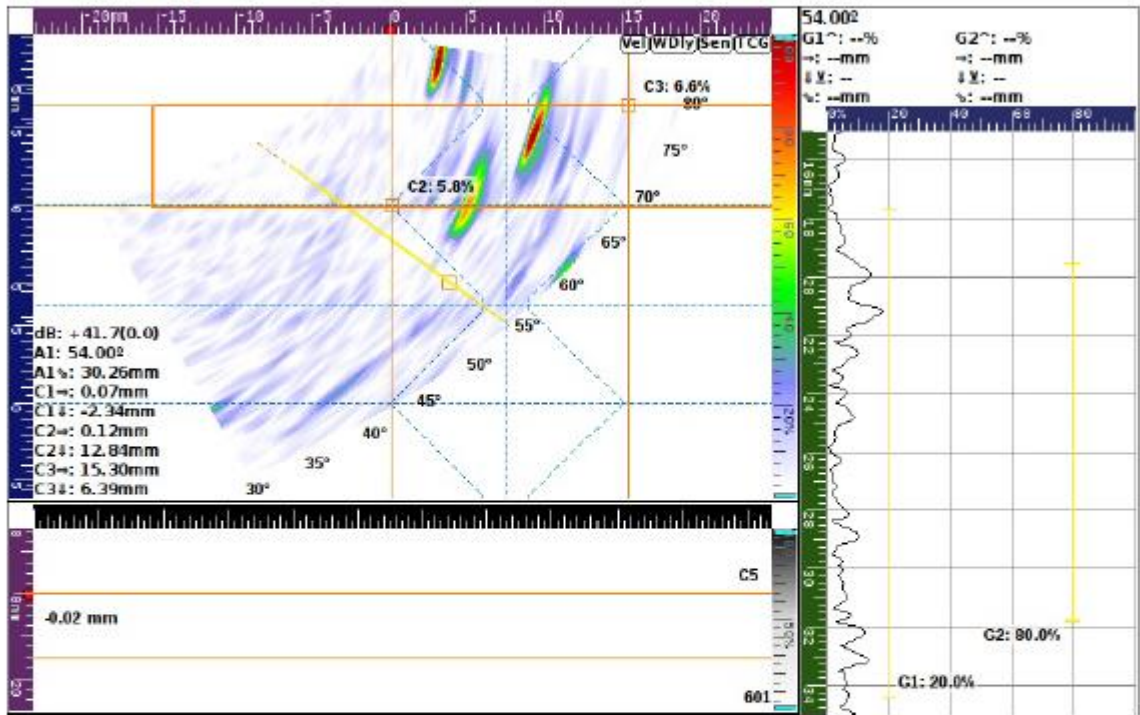
Barrido S1 - Sectorial PE	Valor
Procesamiento de señal...	Auto, Auto: 1:4
Filtro digital	Auto:5.0 MHz
Ganancia , Ref	21.7 dB, 0.0 dB
Focal [Tipo, Dist]	Trayectoria Constante, 35.00 ...
Inicio/Parar Trayectoria	15.00 mm, 50.00 mm
Inicio/Parar Angulo	30.00°, 89.00°
Adq frec.	100 MHz



Veo 16:64 Reporte de inspeccion

Software: 3.13.3, Serie de la Unidad #: I005012

Componente	Nombre del archivo de configuración	Archivos Vers.	Operador	Procedimiento Ref	Fecha de Inspección
MORELCO	Example T1-PE-5.0M32E0.8P T1-35W00-GXR AC.utcfg	10	GXR		2018-03-02 10:54
S2 - Sectorial PE Gain	G1 ^ %FSH	G1 ^ 4 Y	G2 ^ %FSH	G2 ^ 4 Y	G1-G2 ^ %
41.7 dB	--	--	--	--	--



Leyenda:	
S	Abr...
A	Descripción
Subeiorne	BPL Longitud de trayec...
	D Profundidad
	DS Superficie dist.
	A Amplitud
	L Longitud
	DLT Delta

*[Suavizado, Sub-muestreo]

Inspección	Info
Objetivo de la razon del...	Mid
Voltaje Phased Ar.	100 W
Palpador 1 [Freq, Model]	5.00 Mhz, Sonatest-TI-PE-5.0...
Cuña 1 [Velo, Model]	2.330 mm/µs, Sonatest-T1-35...

Información del encoder	
Configuración de codificación	Basado en tiempo
Parte	Info
Material	Acero
Velocidad [LW/SW]	5.890 mm/µs, 3.240 mm/µs
Geometria de parte	Lamina
Espesor	6.40 mm
Soldadura	V sencilla

Barrido/Cursor	Valor1	Valor2	Valor3	Valor4
S1 S-Scan/A1	BPL 30.26 mm	D 17.78 mm	DS 3.78 mm	54.00°
S1 S-Scan/C1	BPL 0.00 mm	D -2.34 mm	DS 0.07 mm	0.00°
S1 S-Scan/C2	BPL 23.72 mm	D 12.84 mm	DS 0.12 mm	57.50°
S1 S-Scan/C3	BPL 31.79 mm	D 6.39 mm	DS 15.30 mm	78.50°
S1 Vista superior/C4	---	---	DS 15.06 mm	S.Eje 748.00 mm
S1 Vista superior/C5	---	---	DS -0.02 mm	S.Eje 600.00 mm
S1 A-Scan/G1	N/A	N/A	N/A	N/A
S1 A-Scan/G2	N/A	N/A	N/A	N/A

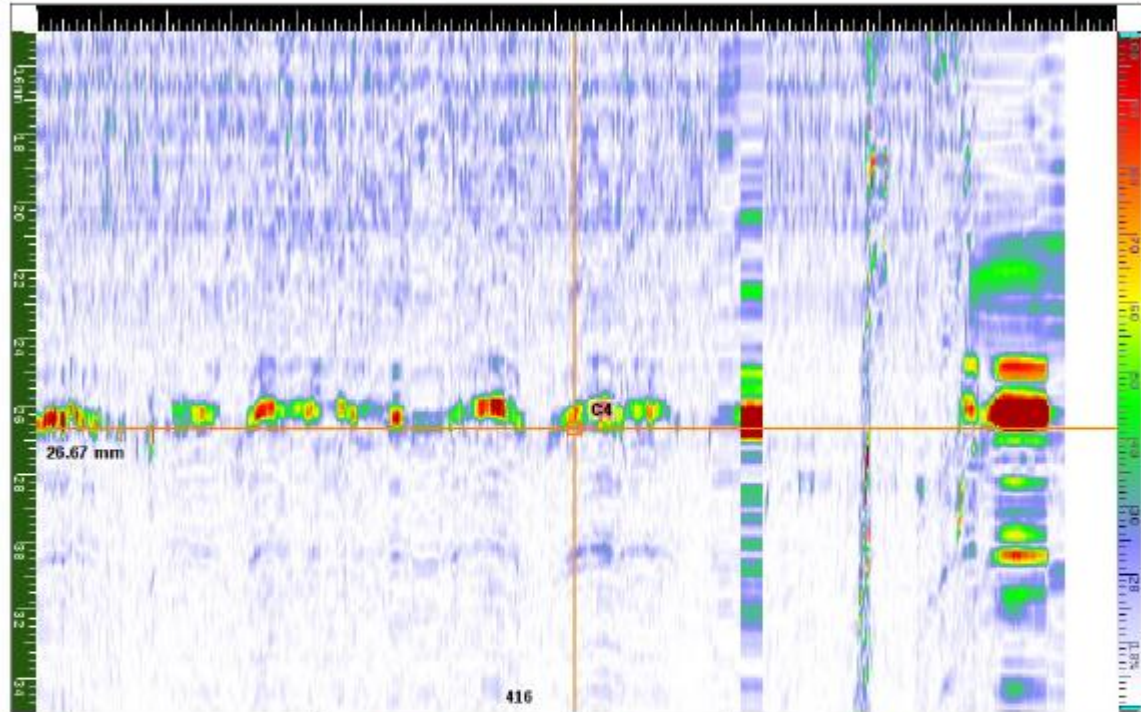
Barrido S1 - Sectorial PE	Valor
Procesamiento de señal...	Auto, Auto: 1:4
Filtro digital	Auto:5.0 MHz
Ganancia , Ref	41.7 dB, 0.0 dB
Focal [Tipo, Dist]	Traectoria Constante, 25.00 ...
Inicio/Parar Trayectoria	15.00 mm, 35.00 mm
Inicio/Parar Angulo	30.00°, 82.00°
Adq frec.	100 MHz



Veo 16:64 Reporte de inspeccion

Software: 3.13.3, Serie de la Unidad #: I005012

Componente	Nombre del archivo de configuración	Archivos Vers.	Operador	Procedimiento Ref	Fecha de Inspección
UIS	Example T1-PE-5.0M32E0.8P T1-35W0D-GXR AC.utcfg	10	GXR		2018-03-02 11:18
S1 - Sectorial PE Gain	G1 ^ %FSH	G1 ^ Δ Ξ	G2 ^ %FSH	G2 ^ Δ Ξ	G1-G2 ^ %
48.7 dB	36.7%	0.58 mmΔ5	--	--	--



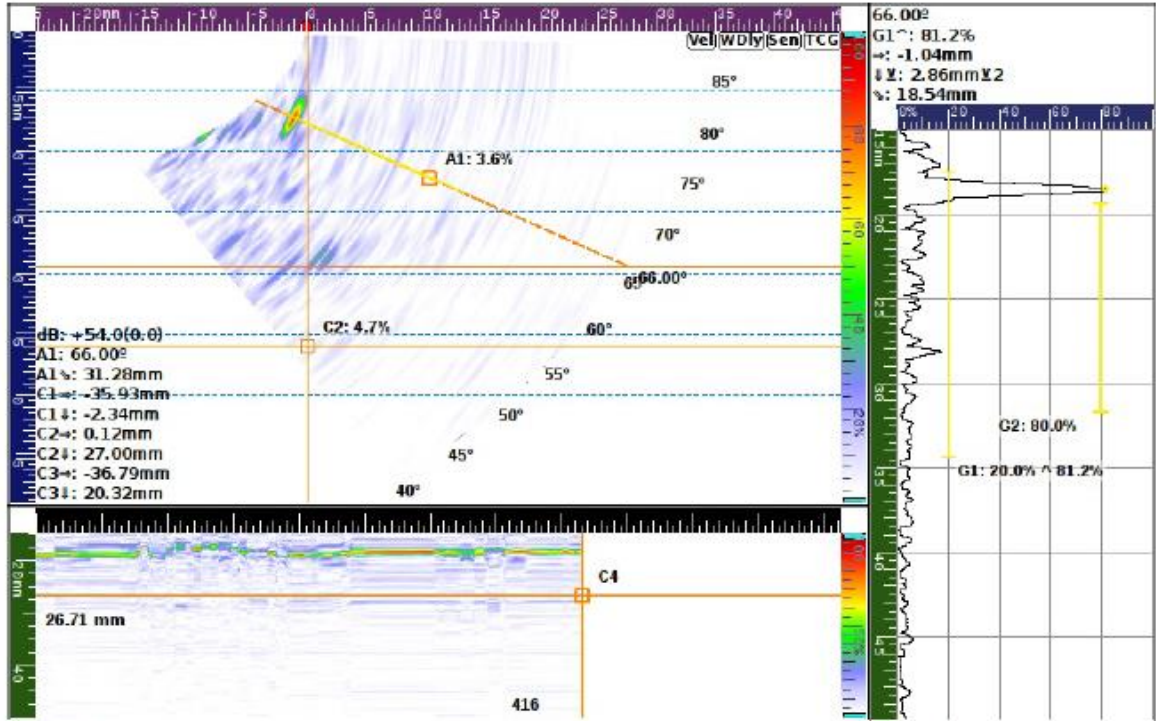
Leyenda:		Inspección		Información del encoder		
S	Abstr...	Objetivo de la razon del...	Mid	Configuración de codificación	Basado en tiempo	
A	Descripción	Voltaje Phased Ar.	100 W	Parte	Info	
B	BPL Longitud de trayec...	Palpador 1 [Freq, Model]	5.00 Mhz, Sonatest-T1-PE-5.0...	Material	Acero	
D	D Profundidad	Cuña 1 [Velo, Model]	2.330 mm/μs, Sonatest-T1-35...	Velocidad [LW/SW]	5.890 mm/μs, 3.240 mm/μs	
DS	DS Superficie dist.			Geometría de parte	Lamina	
A	A Amplitud			Espesor	5.20 mm	
L	L Longitud			Soldadura	Ninguno	
DLT	DLT Delta					
*[Suavizado, Sub-muestreo]						
Barrido/Cursor	Valor1	Valor2	Valor3	Valor4	Barrido S1 - Sectorial PE	Valor
S1 S-Scan/A1	BPL 31.28 mm	D 28.90 mm	DS -16.19 mm	22.50°	Procesamiento de señal...	Alto, Auto: 1:4
S1 S-Scan/C1	BPL 0.00 mm	D -2.34 mm	DS -35.93 mm	0.00°	Filtro digital	Auto:5.0 MHz
S1 S-Scan/C2	BPL 0.00 mm	D 27.00 mm	DS 0.12 mm	0.00°	Ganancia , Ref	48.7 dB, 0.0 dB
S1 S-Scan/C3	BPL 20.38 mm	D 20.32 mm	DS -36.79 mm	-6.50°	Focal [Tipo, Dist]	Trayectoria Constante, 25.00 ...
S1 B-Scan/C4	---	D 24.64 mm	DS -17.96 mm	---	Inicio/Parar Trayectoria	15.00 mm, 35.00 mm
S1 A-Scan/G1	BPL 23.14 mm	D 21.38 mm	DS -19.31 mm	Pico36.7%	Inicio/Parar Angulo	-20.00°, 88.00°
S1 A-Scan/G2	N/A	N/A	N/A	N/A	Adq frec.	100 MHz



Veo 16:64 Reporte de inspeccion

Software: 3.13.3, Serie de la Unidad #: I005012

Componente	Nombre del archivo de configuración	Archivos Vers.	Operador	Procedimiento Ref	Fecha de Inspección
UIS	Example T1-PE-5.0MG2E0.8P T1-35W0D-GXR AC.utcfg	10	GXR		2018-03-02 11:40
S1 - Sectorial PE Gain	G1 ^ %FSH	G1 ^ Δ Y	G2 ^ %FSH	G2 ^ Δ Y	G1-G2 ^ %
54.0 dB	81.2%	2.86 mm Y2	--	--	--



Leyenda:

#br...	Descripción
BPL	Longitud de trayec...
D	Profundidad
DS	Superficie dist.
A	Amplitud
L	Longitud
DLT	Delta

*[Suavizado, Sub-muestreo]

Inspección	Info
Objetivo de la razon del...	Mid
Voltaje Phased A.	100 W
Palpador 1 [Freq, Model]	5.00 Mhz, Sonatest-T1-PE-5.0...
Cuña 1 [Veño, Model]	2.330 mm/µs, Sonatest-T1-35...

Información del encoder	
Configuración de codificación	Basado en tiempo
Parte	Info
Material	Acero
Velocidad [LW/SW]	5.890 mm/µs, 3.240 mm/µs
Geometria de parte	Lamina
Espesor	5.20 mm
Soldadura	Ninguno

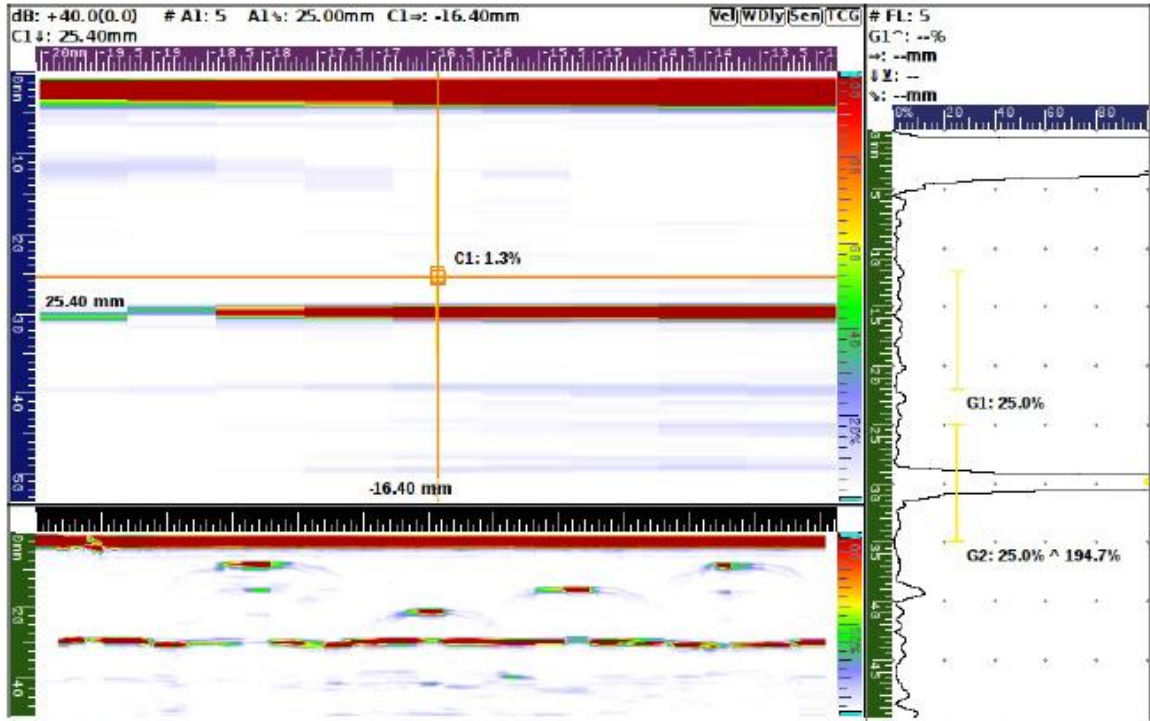
Barrido/Cursor	Valor1	Valor2	Valor3	Valor4	Barrido S1 - Sectorial PE	Valor
S1 S-Scan/A1	BPL 31.28 mm	D 12.72 mm	DS 10.60 mm	66.00°	Procesamiento de señal...	Auto, Auto: 1:4
S1 S-Scan/C1	BPL 0.00 mm	D -2.34 mm	DS -35.93 mm	0.00°	Filtro digital	Auto:5.0 MHz
S1 S-Scan/C2	BPL 35.97 mm	D 27.00 mm	DS 0.12 mm	41.50°	Ganancia , Ref	54.0 dB, 0.0 dB
S1 S-Scan/C3	BPL 0.00 mm	D 20.32 mm	DS -36.79 mm	0.00°	Focal [Tipo, Dist]	Trayectoria Constante, 25.00 ...
S1 B-Scan/C4	---	D 10.86 mm	DS 6.42 mm	---	Inicio/Parar Trayectoria	15.00 mm, 50.00 mm
S1 A-Scan/G1	BPL 18.54 mm	D 7.54 mm	DS -1.04 mm	Pico81.2%	Inicio/Parar Angulo	40.00°, 88.00°
S1 A-Scan/G2	N/A	N/A	N/A	N/A	Adq freq.	100 MHz



Veo 16:64 Reporte de inspeccion

Software: 3.13.3, Serie de la Unidad #: I005555

Componente	Nombre del archivo de configuración	Archivos Vers.	Operador	Procedimiento Ref	Fecha de Inspección
COJINETE	SCAN C PLANA17-2.utcfg	10			2018-03-03 9:04
S2 - Linear PE Gain	G1 ^ %FSH	G1 ^ 1 Y	G2 ^ %FSH	G2 ^ 1 Y	G1-G2 ^ %
40.0 dB	--	--	194.7%	29.89 mm Y1	--



Leyenda:

Abr...	Descripción
BPL	Longitud de trayec...
D	Profundidad
DS	Superficie dist.
A	Amplitud
L	Longitud
DLT	Delta

*[Suavizado, Sub-muestreo]

Inspección	Info
Objetivo de la razon de...	Md
Voltaje Phased Ar.	50 W
Palpador 1 [Freq, Model]	5.00 Mhz, SONATEST-T1-PE-5...
Cuña 1 [Velo, Model]	2.330 mm/µs, SONATEST-T1-35...

Información del encoder	
Configuración de codificación	Basado en tiempo
Parte	Info
Material	Acero
Velocidad [LW/SW]	7.000 mm/µs, 3.240 mm/µs
Geometría de parte	Lamina
Espesor	50.00 mm
Soldadura	Ninguno

Barrido/Cursor	Valor1	Valor2	Valor3	Valor4
S1 L-Scan/A1	BPL 25.00 mm	D 25.00 mm	DS -16.42 mm	0.00°
S1 L-Scan/C1	BPL 25.35 mm	D 25.40 mm	DS -16.40 mm	0.00°
S1 A-Scan/G1	N/A	N/A	N/A	N/A
S1 A-Scan/G2	BPL 29.89 mm	D 29.89 mm	DS -16.42 mm	Pico194.7%

Barrido S1 - Linear PE	Valor
Procesamiento de señales *	Auto, Auto: 1:2
Filtro digital	Auto:5.0 MHz
Ganancia, Ref	40.0 dB, 0.0 dB
Distancia Focal	30.00 mm
Doble Res	No
Inicio/Parar Trayectoria	0.00 mm, 50.00 mm
Angulo / N° Activo de Elem	0.00°, 8
Adq frec.	100 MHz

Mensajes de advertencia	Valor
Barrido S1 - Linear PE	PRF por encima de 1429 Hz puede causar ecos fantasmas.

