

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

## **FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA**

### **INSPECCIÓN NO DESTRUCTIVA DE ELEMENTOS DE TENSIÓN MEDIANTE ULTRASONIDO**

#### **COMPONENTE: DISEÑO DE PROCEDIMIENTOS DE INSPECCIÓN DE PERNOS MEDIANTE UNA TÉCNICA DE ULTRASONIDO EN BASE A DOCUMENTOS ESTANDARIZADOS APLICABLES Y OBTENCIÓN DE PATRONES DE EXAMINACIÓN**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO  
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN  
INGENIERÍA MECÁNICA.**

**MATEO DANIEL OLIVA MOLINA**

**mateo.oliva@epn.edu.ec**

**DIRECTOR: Ing. MARÍA VERÓNICA SOTOMAYOR GRIJALVA, MSc.**

**veronica.sotomayor@epn.edu.ec**

**DMQ, febrero, 2024**



## **CERTIFICACIONES**

Yo, MATEO OLIVA declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

---

**MATEO OLIVA**

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por Mateo Oliva, bajo mi supervisión.

---

**Ing. MARÍA VERÓNICA SOTOMAYOR GRIJALVA**

## **DECLARACIÓN DE AUTORÍA**

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

Mateo Daniel Oliva Molina.

Ing. María Verónica Sotomayor Grijalva, Msc.

## **DEDICATORIA**

A mi amada familia, les dedico con profundo cariño y gratitud este logro significativo. A mis queridos padres, quienes con su apoyo han moldeado mi carácter, brindándome lecciones valiosas sobre la perseverancia y la dignidad en cualquier circunstancia. A mi hermano, a quien agradezco por impartirme la lección de que el esfuerzo constante siempre rinde frutos y puede llevarte a lo más alto. Su influencia ha sido la fuerza impulsora detrás de cada paso que he dado en este viaje.

# AGRADECIMIENTO

# CONTENIDO

CERTIFICACIONES .....	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA .....	II
DEDICATORIA .....	III
AGRADECIMIENTO .....	IV
Contenido .....	IV
Índice de Figuras .....	VI
Índice de Ecuaciones .....	VIII
RESUMEN .....	IX
ABSTRACT .....	X
1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO .....	1
1.1 Objetivo general .....	2
1.2 Objetivos específicos .....	2
1.3 Alcance .....	2
1.4 Marco teórico .....	3
Generalidades de los Pernos .....	3
Ensayos No Destructivos .....	4
Inspección Visual (VT) .....	4
Ensayo de Tintas Penetrantes (PT) .....	5
Ensayo de Partículas Magnéticas (MT) .....	6
Introducción a los Ensayos de Ultrasonido .....	6
Principios Físicos del Ultrasonido .....	6
Propiedades de las Ondas Sonoras .....	7
Que es un piezoeléctrico y que es un transductor .....	8
Sistema de Decibeles .....	11
La Atenuación .....	12
El uso de Acoplantes .....	12
Naturaleza de las Ondas .....	13
Ondas longitudinales y Transversales .....	13
Técnica de Pulso Eco .....	14
Campo Radiado por Transductores .....	15
Técnica de Transmisión de Pulso .....	17
Escaneo Ultrasónico por Arreglo de Fases (PAUT) .....	17
Elementos Tecnológicos en Ensayos de Ultrasonido .....	18
Smartor UT .....	18
Tipos de Presentación de Escaneo .....	19
A-Scan .....	19

B-Scan.....	20
C-Scan.....	21
S-Scan.....	21
2 METODOLOGÍA.....	22
Definición del tipo de perno por estudiar.....	22
Material.....	23
Preparación de los Pernos Patrón.....	24
Variables .....	27
Configuración del Equipo.....	28
Smartor.....	28
Ensayos de Ultrasonido.....	33
3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	37
3.1 Resultados .....	37
3.2 Conclusiones.....	46
3.3 Recomendaciones .....	47
4 Bibliografía.....	48
5 ANEXOS.....	50
ANEXO I .....	50
ANEXO II .....	50
ANEXO III .....	51
ANEXO IV.....	51
ANEXO V.....	52
ANEXO VI.....	52
ANEXO VII.....	53
ANEXO VIII.....	53
ANEXO IX.....	53

## Índice de Figuras

<b>Figura 1.1</b> Piezas que conforman un transductor de doble elemento (Iowa State University , s.f.) .....	9
<b>Figura 1.2.</b> Transductor sin acoplante (Izquierda) y uno con acoplante (Derecha) (Academia Testek, s.f.).....	13
<b>Figura 1.3.</b> Relación entre la dirección de propagación con la compresión y rarefacción. (IAEA, 1988) .....	14
<b>Figura 1.4.</b> Representación de las ondas transversales a través de un material (IAEA, 1988).....	14
<b>Figura 1.5.</b> Rebote ocasionado cuando no existen discontinuidades en el material. (Hellier, 2001) .....	15
<b>Figura 1.6.</b> Diferentes defectos localizados en el ultrasonido. (IAEA, 1988) .....	15
<b>Figura 1.7.</b> Esquema de funcionamiento de un sistema de Transmisión de Pulso. (PRAKASH, 2009) .....	17
<b>Figura 1.8.</b> Convergencia de ondas debido al retraso de tiempo. (Olympus Inspection Solutions, 2010).....	18
<b>Figura 1.9.</b> Distintos picos encontrados en la función de análisis de Soldadura perteneciente al equipo Smartor UT (Fuente Propia).....	20
<b>Figura 1.10.</b> Representación Visual de B-Scan (Holloway NDT & Engineering Inc., 2023).....	20
<b>Figura 1.11.</b> Diferentes tipos de escaneo (Publisher Team, 2022) .....	21
<b>Figura 2.1.</b> Pernos utilizados para definir la metodología (Fuente Propia) .....	22
<b>Figura 2.2.</b> Tabla de clasificación por grado del perno y el material que lo conforma. (Baumeister TSadegh AAvallone E, 2007) .....	23
<b>Figura 2.3.</b> Eliminación de marcas en la cabra del perno (a) perno con marcas y (b) perno esmerilado (Fuente Propia) .....	25
<b>Figura 2.4.</b> Discontinuidades por estudiar, (a) muesca de profundidad 3.5 mm, (b) muesca de profundidad 1.75 mm en perno de 2.5 pulgadas. ....	25
<b>Figura 2.5</b> Localización y profundidad de discontinuidad .....	27
<b>Figura 2.6.</b> Perno utilizado para explicación de calibración .....	28
<b>Figura 2.7.</b> Menú inicial equipo Smartor UT (Fuente Propia) .....	29
<b>Figura 2.8.</b> Apartado de propiedades del transductor (Fuente Propia).....	30
<b>Figura 2.9.</b> Especificaciones del transductor (Fuente Propia).....	30
<b>Figura 2.10.</b> Menú de puerta (Fuente Propia).....	31
<b>Figura 2.11.</b> Menú de Calibración del equipo (Fuente Propia).....	32
<b>Figura 2.12.</b> Colocación de acoplante en el perno (Fuente Propia).....	32
<b>Figura 2.13.</b> Calibración del equipo para perno de 141 mm de longitud (Fuente Propia) .....	33
<b>Figura 2.14.</b> Posición para realizar las pruebas.....	34
<b>Figura 2.15.</b> Movimiento del transductor sobre la cabeza del perno.....	34
<b>Figura 2.16.</b> Inspección de D.I 1, Probeta 1 (Fuente Propia) .....	35
<b>Figura 2.17.</b> Inspección la D.I 1, probeta 3 (Fuente Propia).....	35
<b>Figura 2.18.</b> Inspección D.I 2, Probeta 4 (Fuente Propia) .....	36
<b>Figura 3.1.</b> Relación de detectabilidad.....	38
<b>Figura 3.2.</b> Relación ganancia y Penetración .....	41
<b>Figura 3.3.</b> Relación ganancia y amplitud del equipo .....	42
<b>Figura 3.4.</b> Relación ganancia y ruido.....	43
<b>Figura 3.5.</b> Relación Amplitud y Ruido generado .....	45

## Índice de Tablas

<b>Tabla 1.1.</b> Características de Sonda Dual del equipo SIUI Smartor (Ficha Técnica del equipo).....	18
<b>Tabla 2.1.</b> Propiedades químicas de pernos grado BD (ASTM, A354 , 2017) .....	24
<b>Tabla 2.2.</b> Requerimientos Mecánicas de pernos Grado BC y BD (ASTM, A354 , 2017) .....	24
<b>Tabla 2.3.</b> Localización de Discontinuidad Inducida en cada Probeta con su profundidad.....	26
<b>Tabla 2.4.</b> Velocidad de propagación del sonido en las probetas .....	33
<b>Tabla 3.1.</b> Relación de Detectabilidad en relación con su profundidad.....	37
<b>Tabla 3.2.</b> Probeta 1, D.I. 1 en 30,60 mm con una profundidad de 3.5 mm.....	39
<b>Tabla 3.3.</b> Probeta 1, D.I. 2 en 48.24 mm con una profundidad de 1.75 mm.....	39
<b>Tabla 3.4.</b> Datos de inspección de ultrasonido .....	39

## Índice de Ecuaciones

<b>Ecuación 1.1</b> Velocidad de Ondas Longitudinales (PRAKASH, 2009) .....	8
<b>Ecuación 1.2.</b> Longitud Campo Cercano para transductores redondos (Iowa State University , s.f.) .....	16
<b>Ecuación 1.3.</b> Aplicación de la ecuación de longitud de campo cercano (Iowa State University , s.f.) .....	16

## RESUMEN

Este proyecto se enfoca en abordar la importancia crucial de la inspección de los pernos en la construcción, especialmente en estructuras metálicas. Aunque estos elementos parecen simples, su función es vital para la estabilidad y resistencia de las construcciones. Sin embargo, enfrentan desafíos, como la corrosión y cargas dinámicas, que pueden comprometer su integridad con el tiempo. En el contexto específico de Ecuador, la falta de metodologías establecidas para la inspección de pernos mediante tecnologías avanzadas, como el ultrasonido, representa un riesgo potencial para la seguridad estructural.

El objetivo principal es proponer una metodología específica para la inspección de pernos mediante ultrasonido, aprovechando esta tecnología eficaz para detectar defectos internos en materiales metálicos. Se busca no solo identificar posibles defectos, sino también mejorar la seguridad y prolongar la vida útil de las estructuras. La implementación de esta metodología tiene como objetivo disminuir los riesgos asociados con la degradación de los pernos, estableciendo un estándar para su inspección en diversas aplicaciones. La integración de técnicas avanzadas contribuirá significativamente a la seguridad y confiabilidad de las estructuras, marcando un avance fundamental en la inspección de pernos en Ecuador.

**PALABRAS CLAVE:** perno, ultrasonido, Inspección no destructiva, Técnica pulso eco.

## ABSTRACT

This project focuses on addressing the crucial importance of bolt inspection in construction, especially in metal structures. Although these elements seem simple, their function is vital for the stability and strength of constructions. However, they face challenges such as corrosion and dynamic loads, which can compromise their integrity over time. In the specific context of Ecuador, the lack of established methodologies for bolt inspection using advanced technologies, such as ultrasound, poses a potential risk to structural safety.

The main objective is to propose a specific methodology for bolt inspection using ultrasound, leveraging this effective technology to detect internal defects in metal materials. The aim is not only to identify possible defects but also to enhance safety and extend the lifespan of structures. Implementing this methodology aims to reduce risks associated with bolt degradation, establishing a standard for their inspection in various applications. The integration of advanced techniques will significantly contribute to the safety and reliability of structures, marking a fundamental advancement in bolt inspection in Ecuador.

**KEYWORDS:** bolt, ultrasound, Non-Destructive Testing, Pulse Echo Technique.

# 1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO

El perno, a pesar de su aparente simplicidad, desempeña un papel fundamental en la construcción de grandes obras, destacándose en diversas áreas como la construcción de estructuras metálicas y la ingeniería naval. En el ámbito de las estructuras metálicas, los pernos son esenciales para unir elementos fundamentales como vigas, columnas y placas, aseguran la integridad y estabilizan estructuras. Su versatilidad y capacidad para soportar cargas significativas hacen que sean componentes indispensables en proyectos de ingeniería.

En el ámbito de la ingeniería estructural, los pernos desempeñan un papel crucial durante la construcción de estructuras. Estos elementos de conexión son esenciales para unir las diversas partes y componentes de una construcción, garantizando su resistencia y durabilidad frente a condiciones adversas. Sin embargo, es importante señalar que los pernos en entornos específicos están expuestos a condiciones extremas, como la corrosión por la exposición al agua salada y cargas dinámicas generadas por factores ambientales. Estas condiciones adversas pueden llevar a una degradación constante de los pernos, comprometiendo la seguridad y eficiencia de la estructura con el tiempo.

En el contexto específico de Ecuador, surge una problemática adicional, ya que hasta el momento no existen metodologías establecidas para la inspección de pernos mediante tecnologías avanzadas como el ultrasonido. Este vacío en los procedimientos de inspección impide una evaluación precisa del estado de los pernos, lo que podría derivar en posibles fallas estructurales y, consecuentemente, poner en riesgo la seguridad de las construcciones. Es en este contexto que se plantea la necesidad de desarrollar una metodología específica para la revisión de pernos mediante el uso de ultrasonido industria.

El objetivo principal de este proyecto es proponer una metodología que permita llevar a cabo inspecciones detalladas y no destructivas de pernos utilizando tecnología de ultrasonido. El ultrasonido industrial se ha consolidado como una herramienta eficaz para detectar defectos internos en materiales metálicos, y su aplicación en la inspección de pernos podría revolucionar la forma en que se abordan los problemas de degradación y corrosión. Esta metodología propuesta no solo busca identificar posibles defectos en los pernos, sino también mejorar los niveles de seguridad del sistema mecánico y prolongar la vida útil de las estructuras.

Al implementar esta metodología, se espera disminuir los riesgos asociados con la degradación de los pernos al establecer un estándar para la inspección de estos elementos en diversas aplicaciones. La integración de técnicas avanzadas como el ultrasonido no solo mejora la eficiencia de las inspecciones, sino que también contribuye significativamente a la seguridad y confiabilidad de las estructuras.

## **1.1 Objetivo general**

Diseñar un procedimiento para realizar la inspección de pernos mediante una técnica de ultrasonido en base a documentación estandarizada aplicable, obteniendo un patrón de realización.

## **1.2 Objetivos específicos**

1. Producir patrones de inspección que incorporen discontinuidades con el fin de evaluar las restricciones de la metodología.
2. Desarrollar un protocolo paso a paso que detalle cómo realizar la inspección de pernos haciendo uso de equipos de ultrasonido de manera eficiente y precisa.
3. Establecer un procedimiento de inspección basado en la documentación estandarizada existente.

## **1.3 Alcance**

El alcance del proyecto de inspección mediante ultrasonido abarca la familiarización con el equipo de ultrasonido disponible en el Laboratorio de Ensayos No Destructivos de la FIM EPN, así como su correcto uso para llevar a cabo pruebas específicas en pernos. Este proceso implica comprender el funcionamiento del equipo, sus capacidades y limitaciones, y aplicar técnicas de inspección de ultrasonido como al técnico pulso eco para evaluar la integridad estructural de los pernos. Además, se contempla la necesidad de definir un procedimiento detallado de inspección, basado en documentos estandarizados, que incluya la obtención de patrones de calibración y comprobación de pernos correspondientes. Este enfoque busca facilitar una interpretación acertada de las señales ultrasónicas, contribuyendo a una evaluación confiable de la integridad de los pernos.

## 1.4 Marco teórico

### Generalidades de los Pernos

Como se mencionó anteriormente, el perno es un elemento mecánico de gran importancia para varias áreas de la ingeniería. Es un elemento que debe soportar grandes cargas cortantes pero que no suele ser considerado en ciertos casos al momento de realizar mantenimiento del sistema que lo conforma. Así como todo elemento mecánico este pasa por un ciclo de vida que depende del tipo de cargas que soporta, estas cargas estáticas o dinámicas, estas influyen en los tipos de fallas que puede presentar al llegar casi al final de su vida.

Dependiendo del área de trabajo en el cual se emplea este elemento puede ser la causa de al menos el 70% de los accidentes en la ingeniería debido a fallas por fatiga cuando se hace uso de pernos de alta resistencia estando en su tiempo de servicio. (Ping, Jiachun, Yu, & Jiaxiao, 2023)

Según la ASTM F788, existen 8 tipos de discontinuidades superficiales que se pueden presentar en los pernos. (ASTM , 2020)

1. **Grietas:** Entre los tipos de grietas que se pueden encontrar estas la producidas por el enfriamiento rápido y las grietas producidas en la forja del perno.
2. **Rupturas por cizalladura:** Se indican como rupturas en la parte externa del metal, normalmente localizadas en la cabeza del perno, suele ocurrir en un ángulo de 45° en relación con el eje del producto. Se pueden encontrar típicamente en pernos de cabeza hexagonal.
3. **Costuras:** Las costuras se muestran como líneas rectas y lisas, se pueden encontrar a lo largo del cuerpo del perno y también en la cabeza del perno de forma longitudinal.
4. **Pliegues:** Se presentan como succiones del material, pueden encontrarse en el cuerpo del perno y de igual manera en la cabeza del perno.
5. **Solapados de rosca:** El solapado de rosca se muestra como fisuras que pueden iniciar en el diámetro máximo o en el diámetro menor de la rosca. Solapados que no son permisibles son aquellos que se encuentran en el diámetro menor o los que atraviesan desde la rosca hasta una altura no mayor al 20% del diámetro máximo en dirección del eje de giro del perno.

6. **Huecos o vacíos:** Es una cavidad de poca profundidad que se debe por la falta de llenado del material durante la forja.
7. **Marcas de herramientas:** Son ranuras longitudinales o circunferenciales de poca profundidad que se producen por la utilización de herramientas sobre la superficie del perno.
8. **Muecas:** Indentación localizada en la superficie del perno que se produce por el impacto con otro elemento durante la fabricación del equipo, manipulación o su transporte.

De los 8 tipos de discontinuidades que se presentaron, los solapados de rosca y las muescas pueden ocurrir a lo largo de la vida útil del elemento ya instalado, mientras que el resto se originan por problemas preexistentes en el material base o durante la fabricación de los pernos.

### **Ensayos No Destructivos**

Los Ensayos No Destructivos (END) son como su nombre indica, una evaluación o examinación desarrollada sobre un objeto sin cambiar o alterar el objeto de ninguna manera. Estos tipos de ensayos se realizan para determinar si existen o no discontinuidades u otro tipo de condiciones que no sean favorables para la utilidad del objeto disminuyendo la vida útil del mismo. (Hellier, 2001)

La norma ASTM F788, en su apartado 6 dedicado a la inspección y evaluación del estado de los pernos, especifica que después de la fabricación de estos elementos, se deben llevar a cabo inspecciones en busca de las discontinuidades mencionadas previamente. Esto incluye la inspección visual con elementos que tengan una capacidad de aumento de 10 veces. Además, se recomienda la aplicación de ensayos con fluidos penetrantes y partículas magnéticas. En esta norma no se especifica algún tipo de Ensayo no Destructivo volumétrico como el Ultrasonido o los Ensayo de Radiografía. Es importante señalar que estos métodos de inspección se aplican únicamente a pernos recién fabricados y no abordan la inspección durante su periodo de servicio.

Estos tipos de ensayos de igual manera se realizan en el laboratorio de Ensayos no Destructivos de la Escuela Politécnica Nacional y sus características se exhibirán a continuación:

#### **Inspección Visual (VT)**

La Inspección Visual (VT) es un método de examinación que a menudo se subestima, a pesar de ser el primer método de prueba no destructiva utilizado, y curiosamente, el

último en ser reconocido (Hellier, 2001). Este método es ampliamente utilizado, ya que las personas confían en su capacidad visual en situaciones cotidianas para evaluar la condición e integridad de diversos objetos y entornos, desde la frescura de los alimentos en el supermercado hasta la identificación de posibles daños en la ropa antes de comprarla.

En la actualidad, existe una variedad de equipos diseñados para respaldar este método de inspección, considerados como ayudas directas o indirectas según su naturaleza. Los equipos de ayuda directa incluyen magnificadores, dispositivos que aumentan el tamaño de la imagen del objeto observado, con potencias comunes de 5, 10 y 20 aumentos. También se encuentran dispositivos de medición, como el Calibrador Vernier o Calibrador Pie de Rey, que permiten evaluar las dimensiones de discontinuidades y su rango de inspección.

Sin embargo, la inspección visual de pernos presenta limitaciones, no es posible conocer la existencia de huecos o fisuras internas en la rosca del perno debido a su geometría. Existe dificultad de obtener resultados precisos sobre posibles daños en el hilo de la rosca en la mayoría de los casos. Además, se debe considerar que este tipo de ensayo requiere un acceso total al elemento, lo cual puede ser difícil en áreas donde existen obstrucciones como reducida intensidad lumínica para la persona encargada de la inspección.

### **Ensayo de Tintas Penetrantes (PT)**

El ensayo de Tintas Penetrantes es ampliamente reconocido en la detección de discontinuidades superficiales en materiales sólidos no porosos. Es un método altamente útil debido a su aplicabilidad a cualquier tipo de material, ya sea magnético o no magnético, y se puede emplear en materiales de diversas dimensiones. Además, su equipamiento es fácil de transportar. (Hellier, 2001)

El principio fundamental del ensayo de Tintas Penetrantes se basa en el fenómeno de la capilaridad. La capilaridad se define como el "fenómeno por el cual la superficie de un líquido en contacto con un sólido se eleva o desciende según aquel moje o no a este" (RAE, 2023). La alta capilaridad de los líquidos utilizados en este método permite la penetración en las discontinuidades superficiales. Este líquido, conocido como penetrante, junto con el uso de un revelador, facilita la identificación de las discontinuidades de manera más clara.

A pesar de sus ventajas, el ensayo de Tintas Penetrantes presenta limitaciones en la inspección de pernos, ya que no se puede realizar en pernos ya instalados. Además, se

requiere un ambiente controlado y libre de contaminantes, ya que cualquier contaminación del penetrante invalidará el ensayo, obligando a limpiar el elemento y reiniciar la inspección.

### **Ensayo de Partículas Magnéticas (MT)**

El ensayo de partículas magnéticas, como su nombre sugiere, utiliza partículas muy finas que pueden ser afectadas por un campo magnético circundante. Estas partículas se aplican sobre la superficie que se va a inspeccionar, y bajo la influencia del campo magnético, se acumulan en las discontinuidades presentes. Al igual que en los ensayos anteriores, la limitación principal de este método persiste: se requiere un acceso completo al material y no se puede llevar a cabo cerca de elementos que puedan ser afectados por el campo magnético.

### **Introducción a los Ensayos de Ultrasonido**

El ensayo por ultrasonido se encuentra entre los ensayos no destructivos más populares e utilizados en lo que corresponde la detección de discontinuidades subsuperficiales e internas. Por esta razón se le conoce al ensayo de Ultrasonido como un ensayo volumétrico, lo cual quiere decir que es posible examinar todo el cuerpo del material en búsqueda de defectos. Sumado a esto, este ensayo permite realizar mediciones del espesor con elevada precisión en condiciones en las cuales no es posible realizar dichos controles con métodos tradicionales.

El método de Ultrasonido también es reconocido por tener alto poder de penetración en los materiales, esto se debe a su naturaleza de hacer uso de vibraciones en alta frecuencias lo que permite detectar discontinuidades diminutas. (PRAKASH, 2009)

En el ultrasonido se hace uso de varias técnicas, pero en la industria se conocen especialmente dos técnicas: la primera se conoce como pulso-eco, en esta solo es necesario tener acceso a la superficie de la muestra; la segunda, conocida como técnica de pulso transmisión hace uso de ambas caras del elemento a examinar. Estas técnicas se abarcarán más adelante con mayor profundidad.

### **Principios Físicos del Ultrasonido**

El ultrasonido industrial se basa en la propagación de ondas sonoras a frecuencias elevadas a través de materiales sólidos. La frecuencia, definida como el número de ciclos en relación con la unidad de tiempo indica la cantidad de ciclos que ocurren en un segundo. Es importante destacar que la capacidad auditiva humana se encuentra en el

rango de 20 Hz a 20 kHz, los equipos de ultrasonido industrial operan comúnmente en el rango de los Mega Hertz (MHz), superando significativamente este límite.

Se puede interpretar a estos sistemas de vibración como un sistema de balanceo de un resorte con posiciones identificadas como A (comprimida), B (equilibrio) y C (extendida). Se considera que el movimiento del sistema iniciando en el punto A que se desplaza hacia los demás puntos B y extenderse hasta C para finalmente volver al punto A, el tiempo que toma en realizar este movimiento se conoce como un ciclo de movimiento, este movimiento continuo a través de estas posiciones genera un ciclo constante. La relación del número de ciclos a lo largo del tiempo se conoce como frecuencia, medida en ciclos por segundo, mientras que la amplitud representa el máximo desplazamiento del sistema vibratorio.

Esta capacidad de generar ondas sonoras de alta frecuencia permite a los equipos de ultrasonido industrial detectar y analizar materiales sólidos en profundidad, proporcionando información valiosa sobre su integridad y características internas. La combinación de alta frecuencia y amplitud en el ultrasonido industrial lo convierte en una herramienta eficaz para inspecciones no destructivas y evaluaciones detalladas de diversos materiales.

### **Propiedades de las Ondas Sonoras**

Algunas propiedades de las ondas sonoras pueden diferir por diversos factores, entre los cuales es crucial considerar la densidad y elasticidad del material. La velocidad de propagación de las ondas sonoras exhibe variaciones notables al comparar, por ejemplo, el acero con otros metales como el aluminio, así como al contrastar la velocidad en elementos líquidos o gaseosos.

Esta diferencia se fundamenta en la proximidad de las moléculas del material, donde la fuerza de los enlaces juega un papel esencial para facilitar la transmisión de la energía sonora. La elasticidad del material también desempeña un papel crucial, permitiendo que las moléculas regresen rápidamente a sus posiciones iniciales después de ser perturbadas, lo que facilita la propagación veloz de las ondas sonoras.

En función de estas dos propiedades, la velocidad de una onda sonora a través de un material sólido establece una relación entre su densidad ( $\rho$ ) y su módulo de elasticidad

(E). Específicamente, la velocidad de las ondas de compresión, también conocidas como ondas longitudinales en un material, se calcula mediante la fórmula siguiente:

$$V_c = \sqrt{\frac{E}{\rho} * \frac{1 - \sigma}{(1 + \sigma)(1 - 2\sigma)}}$$

**Ecuación 1.1** Velocidad de Ondas Longitudinales (PRAKASH, 2009)

Donde:

$V_c$  = Velocidad de Ondas de Compresión (m/s)

$E$  = Modulo de elasticidad (N/m<sup>2</sup>)

$\rho$  = Densidad del material (kg/m<sup>3</sup>)

$\sigma$  = Coeficiente de Poisson

Cabe recalcar que la **Ecuación 1.1** Error! Reference source not found. no produce valores exactos, esto se debe a que existen variables como la temperatura, tamaño de grano del metal, método de fabricación del elemento, entre otros factores que hacen variar este valor. Esta ecuación permite acercarse a un rango cercano al real.

Es importante recalcar que la velocidad de propagación de la onda sonora en un material solido es muy diferente a la velocidad en el aire, se estima que la velocidad del sonido a través del acero se encuentra entre los 5740 m/s hasta 5890 m/s según la empresa Olympus. (Olympus, s.f.) En cambio al diferenciar con la velocidad de propagación del sonido a través del aire a temperatura ambiente, valor que se encuentra alrededor de los 344 m/s. (YOUNG, 2009)

## Que es un piezoeléctrico y que es un transductor

Un material piezoeléctrico es un tipo especial de cristal o cerámico con la capacidad de generar una carga eléctrica como respuesta a una deformación o presión sobre él y viceversa. Este fenómeno propio de este tipo de material permite generar ondas de alta frecuencia y a su vez permiten recibir este tipo de ondas para su procesamiento e interpretar en un equipo especializado del cual se hablará más adelante. (Gallego-Juárez, 1999)

Existen varios tipos de materiales que tienen las características de piezoeléctricos son los siguientes:

- Cuarzo

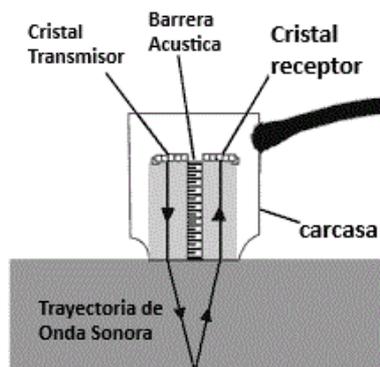
- Sal de Seignette
- Cerámicos
- Cerámicos piezoeléctricos
- Titanato de bario

El transductor en cambio es el dispositivo que hace uso de un material piezoeléctrico para generar y recibir ondas ultrasónicas. En la parte emisora del transductor, se aplica un voltaje al material piezoeléctrico. Este voltaje causa la deformación mecánica en el material generando de esta manera las ondas sonoras de alta frecuencia. Al contrario, en la parte receptora las ondas ultrasónicas generan las deformaciones en el material, deformaciones que generan una corriente eléctrica que es detectada, registrada e interpretada por el equipo correspondiente.

A su vez existen varios tipos de transductores utilizados en el Laboratorio de Ensayos no Destructivos, donde se emplean los conocidos como transductores de contacto, normalmente se consideran en esta categoría:

### 1. Transductores de Doble Elemento:

Este tipo de transductores contiene dos piezoeléctricos que operan de manera independiente en la misma carcasa del transductor. En un lado se encuentra un cristal piezoeléctrico que produce ondas sonoras y las transmite a través del material, el otro cristal recibe la onda sonora y transforma dicha vibración. La **Figura 1.1** muestra cuales son las piezas que conforman un transductor de doble elemento.



**Figura 1.1** Piezas que conforman un transductor de doble elemento (*Iowa State University, s.f.*)

## **2. Transductor de línea de Retardo:**

El transductor de línea de retardo se utiliza para introducir un retraso de tiempo entre la generación de la onda de sonido y la llegada de cualquier onda reflejada. Esto mejora la resolución superficial al completar la función de "envío" antes de comenzar la función de "escucha". Se emplea en aplicaciones como la medición precisa de espesores en materiales delgados y la detección de delaminaciones en materiales compuestos, siendo útil también en mediciones a alta temperatura debido a la capacidad de la línea de retardo para aislar el elemento piezoeléctrico del calor.

Existen diferentes tipos de transductores ultrasónicos, cada uno de estos transductores se especializa en cierta aplicación de inspección de ultrasonido, a continuación, se presentan algunos de estos elementos según el libro "Non-Destructive Testing Techniques" de Ravi Prakash (PRAKASH, 2009):

## **3. Transductores de Contacto de Haz Recto:**

Utilizan cristales con un electrodo en una cara, y la otra cara queda expuesta. Se emplean para probar superficies planas y son ampliamente utilizados en el rango de frecuencia de 500 kHz a 10 MHz.

## **4. Transductores de Haz Recto con Cara Protectora:**

Permiten probar superficies rugosas y pueden ser buenos o malos conductores de electricidad. Tienen electrodos en ambos lados del cristal piezoeléctrico y utilizan placas de desgaste para protección.

## **5. Transductores de Haz Angular de Contacto:**

Utilizan una cuña de plástico entre el cristal piezoeléctrico y la muestra para dirigir el haz ultrasónico hacia un área específica.

## **6. Transductores Ultrasónicos de Inmersión:**

Se utilizan en pruebas no destructivas con métodos de pulso-eco y a través de la transmisión. Se sumergen en agua para acoplar acústicamente con la muestra. Disponibles en el rango de frecuencia de 0.5 MHz a 20 MHz.

## **7. Transductores Ultrasónicos Focales:**

Incluyen una lente acústica que permite enfocar el haz ultrasónico, similar a una lupa óptica. Se utilizan para inspeccionar áreas pequeñas y proporcionar detalles detallados.

### **8. Transductores de Onda Longitudinal:**

Producen ondas en las que las partículas del medio vibran a lo largo de la dirección del viaje del haz. Se conocen como ondas longitudinales o de compresión y son utilizadas en diversos tipos de transductores.

### **9. Transductores de Onda Transversal:**

Producen ondas en las que las partículas del medio vibran perpendicularmente a la dirección del viaje del haz. Conocidos como transductores de onda de corte o transversal, se utilizan en inspecciones específicas.

### **10. Transductores de Onda Superficial:**

Producen ondas que se propagan a lo largo de la superficie del material debido a la reflexión total interna. Se emplean para inspecciones de superficies y se caracterizan por su ángulo de incidencia crítico.

## **Sistema de Decibeles**

El término "ganancia" en un equipo de ultrasonido está vinculado a la medida en decibelios (dB). Este parámetro se emplea para indicar la amplificación o atenuación de la señal ultrasónica.

El sistema de decibeles (dB) se hace uso en el ultrasonido para expresar la amplitud relativa de las ondas que atraviesan el material a su vez que permite medir la intensidad de la señal. (Hellier, 2001). El decibelio es una medida que se emplea para indicar la intensidad de la energía sonora. Se calcula como veinte veces el logaritmo común de la relación entre la presión generada por la energía del sonido y una presión de referencia. Este sistema se puede hacer uso para cuantificar la atenuación, ganancia o la pérdida de la señal ultrasónica en la medida que atraviesa un material. De ahí su importancia, permite el ajuste de la amplitud de la señal para de esta manera compensar las pérdidas por atenuación o por absorción en el material, así se garantiza una buena imagen ultrasónica que permita una buena lectura de los datos con el menor error posible.

Pero hay que tomar en consideración que al elevar el valor de la ganancia, se puede introducir un fenómeno que se conoce como ruido, el ruido se considera como la presencia indeseada de señales que afectan a la calidad de la imagen, se puede mostrar como un patrón aleatorio o como la interferencia de una geometría no regular y que interactúa con las ondas sonoras de una manera no deseada como puede dar en el caso de la rosca de los pernos.

## **La Atenuación**

La atenuación se puede considerar como una variable muy importante a considerar, la atenuación varía entre cada material y se expresa en unidades de decibeles por milímetro (dB/mm), su comprensión es de gran importancia esto se debe a que la presencia de defectos en un área del material a investigar produce un aumento en los valores de atenuación al comparar con lugar donde no existen defectos, esta diferencia es una de las razones que permite a la técnica de ultrasonido localizar y observar la gravedad de las discontinuidades presentes en el interior del material. (PRAKASH, 2009)

## **El uso de Acoplantes**

Los acoplantes desempeñan un papel fundamental en los ensayos de ultrasonido, ya que la superficie de prueba nunca es completamente lisa. A pesar de lo pulida o preparada que pueda estar, siempre presenta irregularidades. Debido a estas imperfecciones, el transductor no puede enviar las ondas de ultrasonido al material de manera eficiente, ya que el aire presente entre el material y el transductor actúa como un pobre conductor para estas ondas. Como solución a este problema, se recurre a los acoplantes, sustancias diseñadas para eliminar el aire presente entre el transductor y el metal.

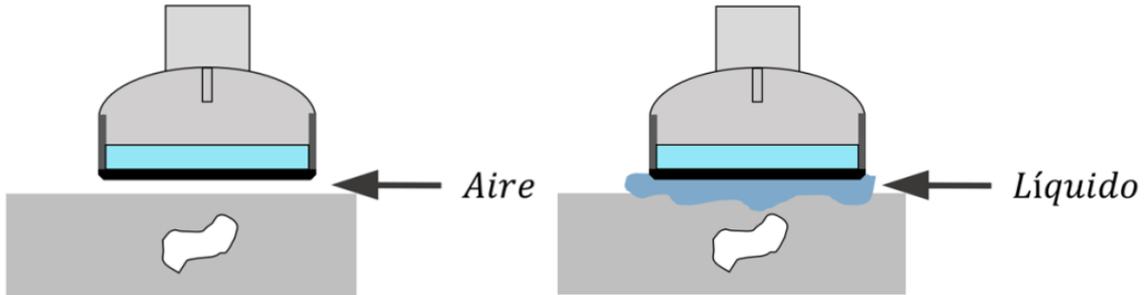
Conforme al "Handbook of Nondestructive Evaluation", la mayoría de los acoplantes permiten una transmisión de la onda sonora en un rango de entre el 10% y el 15% de la onda original, destacando la glicerina como la sustancia que posibilita un 15% de la transmisión inicial, a diferencia de la transmisión en la interfaz entre el sólido y aire que presenta una reflexión del 100% de la onda. (Hellier, 2001). Por esta razón, en el Laboratorio de Ensayos No Destructivos de la Escuela Politécnica Nacional, se opta comúnmente por el uso de glicerina vegetal.

De igual manera el libro anterior mencionado no indica que existen otros tipos de acoplantes que se utilizan en la industria, los cuales son:

- Agua
- Queroseno
- Aceite
- Grasas
- Glicerina

- Gel diseñado con este propósito

A continuación, se presenta un diagrama que ilustra la diferencia entre la utilización y la omisión del acoplante.



**Figura 1.2.** Transductor sin acoplante (Izquierda) y uno con acoplante (Derecha)  
(Academia Testek, s.f.)

### Naturaleza de las Ondas

Existen varios métodos de propagación de las ondas sonoras, esencialmente existen cuatro tipos que son los siguientes (IAEA, 1988):

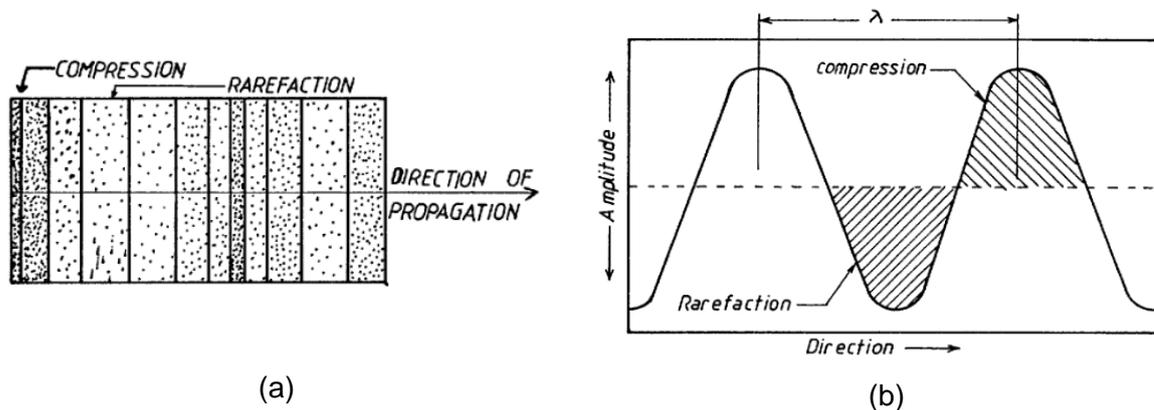
- Ondas de Compresión conocidas como ondas longitudinales
- Ondas Cortantes conocidas como ondas Transversales
- Ondas de superficie conocidas como ondas Rayleigh
- Ondas de Lamb conocidas como ondas de placa

En el estudio volumétrico por ultrasonido hace uso de las dos primeras, por ende, serán los tipos de ondas que se tomarán en cuenta para este trabajo.

### Ondas longitudinales y Transversales

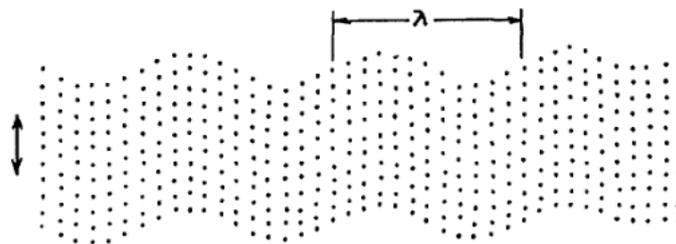
Las Ondas Longitudinales u Ondas compresivas se denominan de esta manera ya que las partículas se mueven en la misma dirección que la energía se propaga. En este tipo de ondas se producen dos fenómenos: la compresión y la rarefacción como se observar en el literal (a) de la **Figura 1.3.** (IAEA, 1988).

Al considera el movimiento de las partículas, es posible observar que el proceso de compresión y rarefacción muestra un movimiento que es posible definir como una onda sinusoidal cómo se aprecia en el literal (b) de la **Figura 1.3.**



**Figura 1.3.** Relación entre la dirección de propagación con la compresión y rarefacción. (IAEA, 1988)

En el caso de las ondas transversales, este tipo de ondas se mueven en un plano perpendicular en relación con la energía transmitida. Este tipo de ondas, también se conocen ondas cortantes debido a la dirección del movimiento de las partículas del material, debido a este movimiento es necesario que el material tenga enlaces fuertes debido a que una partícula debe de jalar a su contigua, este fenómeno es la razón por la cual la velocidad de propagación transversal se suele encontrar entre el 50% y el 55% de la velocidad transversal. (PRAKASH, 2009)



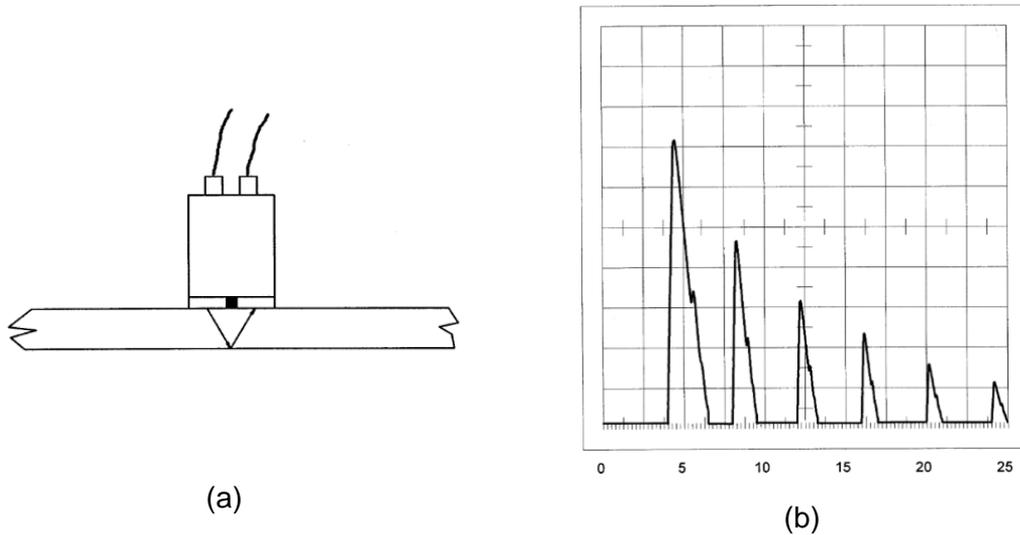
**Figura 1.4.** Representación de las ondas transversales a través de un material (IAEA, 1988)

### Técnica de Pulso Eco

La técnica de pulso-eco la técnica de ultrasonido más conocida y a su vez más utilizada, uno de los factores de su popularidad se encuentra en su simplicidad ya que solo es necesario de hacer uso una de las caras del elemento a diferencia de la técnica de Pulso Transmisión.

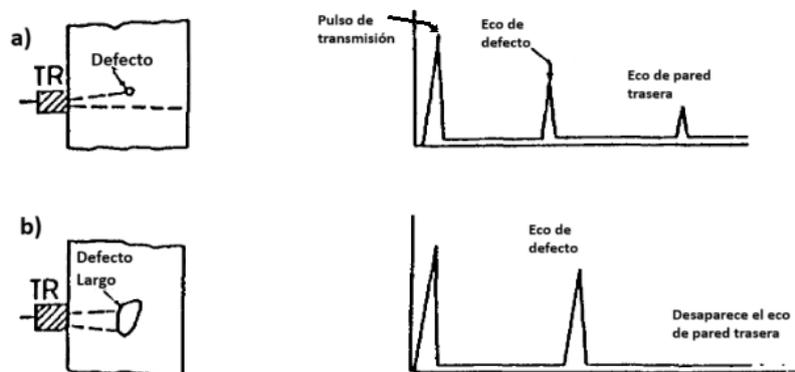
Para esta técnica se puede hacer uso de transductores de contacto de Haz Recto, de Haz Recto con Cara Protectora, por Inmersión, este tipo de transductores deben ser transductores de elementos duales debido a la naturaleza del ensayo de este trabajo,

esto lleva a que en las lecturas se existan una lectura del pulso inicial y una o varias lecturas correspondientes al eco existente con el final del material como se podrá observar en la **Figura 1.5**.



**Figura 1.5.** Rebote ocasionado cuando no existen discontinuidades en el material. (Hellier, 2001)

En situaciones donde una discontinuidad se encuentra a lo largo del trayecto de la onda de ultrasonido, se manifiesta como un pico, como se ilustra en la sección (a) de la **Figura 1.6**. La altura de este pico depende de la sensibilidad del equipo y del tamaño de la discontinuidad, tal como se muestra en la sección (b) de la **Figura 1.6**. En algunos casos, como el ejemplo presentado, el eco de la pared posterior puede llegar a desaparecer.



**Figura 1.6.** Diferentes defectos localizados en el ultrasonido. (IAEA, 1988)

El sonido producido por un elemento piezoeléctrico no se origina en un solo lugar, sino que se produce a lo largo de la superficie del elemento. En los transductores redondos se puede producir un campo de sonido con una forma cilíndrica donde la intensidad de estas ondas se produce en el área más cercana al transductor y se dispersan a lo largo del cilindro.

Debido a esta elevada intensidad, se puede producir interferencia de tipo constructiva y destructiva, este fenómeno se lo conoce como efecto de la difracción. Esta interferencia que afecta a la evaluación de defectos en un área conocida como campo cercano. Luego de atravesar el campo cercano se encuentra un área con ondas más uniformes que son aptas para una mejor inspección.

La fórmula para el cálculo de la distancia al campo cercano es la siguiente:

$$N = \frac{D^2 * F}{4 * V * (1000)}$$

**Ecuación 1.2.** Longitud Campo Cercano para transductores redondos (*Iowa State University, s.f.*)

Donde:

N= Longitud del Campo Cercano (mm)

D= Diámetro del Transductor (mm)

F= Frecuencia ( $s^{-1}$ )

V= Velocidad de propagación del sonido en el material (m/s)

En el caso que se tenga un transductor de 10 mm de diámetro que haga uso de una frecuencia de 5 MHz en un acero con una velocidad aproximada de 5900 m/s se tiene el siguiente ejemplo:

$$N = \frac{(10 \text{ mm})^2 * 5\,000\,000 \text{ s}^{-1}}{4 * 5900 \text{ m/s} * (1000)} = 21.19 \text{ mm}$$

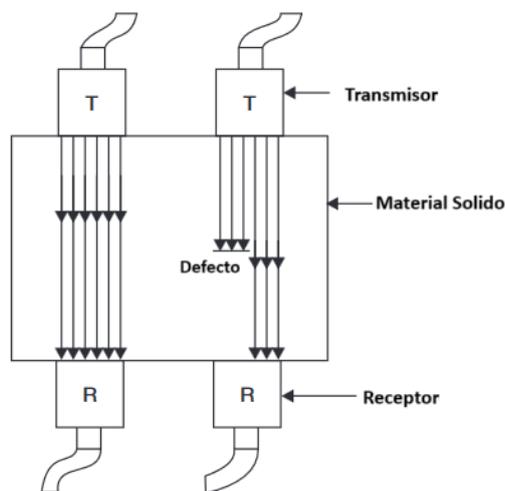
**Ecuación 1.3.** Aplicación de la ecuación de longitud de campo cercano (*Iowa State University, s.f.*)

Se hace uso de un factor de conversión de 1000 mm por cada metro para igualar las unidades del numerador y el denominador. Esta aplicación quiere decir que las mediciones para un acero con una velocidad de propagación de aproximadamente 5900 m/s con un transductor de las características anteriores, se pueden realizar mediciones

con mayor precisión luego de una distancia de 21.19 mm desde la localización del transductor.

### Técnica de Transmisión de Pulso

La técnica de transmisión de pulso implica la colocación de un transmisor en una cara del material sólido y un receptor en la cara opuesta. De esta manera, se lleva a cabo la transmisión de ondas ultrasónicas a lo largo del material. En el caso de que existan discontinuidades o defectos en el interior del material, es posible observar una notable disminución en la energía enviada, dependiendo, claro está, de la geometría y longitud de la discontinuidad.



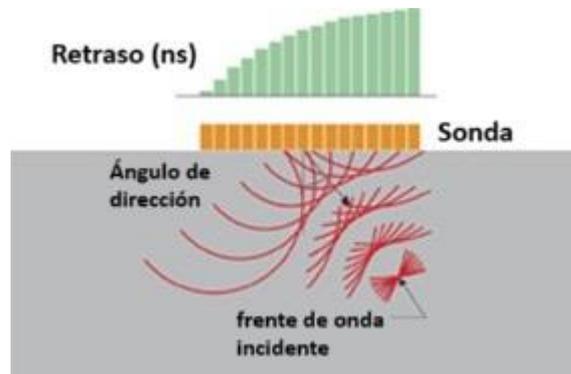
**Figura 1.7.** Esquema de funcionamiento de un sistema de Transmisión de Pulso.  
(PRAKASH, 2009)

### Escaneo Ultrasónico por Arreglo de Fases (PAUT)

El escaneo por arreglo de fases se distingue notablemente de otros métodos convencionales de escaneo industrial, y esta distinción radica en el uso de transductores específicos. Los transductores empleados en el Escaneo de Arreglo de Fases comúnmente constan de 16 a 256 elementos.

En consonancia con lo mencionado anteriormente, estos elementos pueden organizarse en grupos de 4 a 32, generando ondas en diferentes tiempos. De esta manera, el software, conocido como calculador de ley focal, encargado de enviar las ondas ultrasónicas, establece los tiempos de retardo para cada grupo. Esto permite generar un haz más adecuado según la sonda utilizada, la zapata en uso, la geometría y la naturaleza del material. Estos diversos frentes de onda se reconstruyen en un único

frente de onda, posibilitando la detección de discontinuidades, defectos y la pared de fondo en un área más extensa en comparación con las técnicas convencionales previas.



**Figura 1.8.** Convergencia de ondas debido al retraso de tiempo. (*Olympus Inspection Solutions, 2010*)

## Elementos Tecnológicos en Ensayos de Ultrasonido

### Smartor UT

Este equipo, elaborado por la marca SIUI y perteneciente al Laboratorio de Ensayos no Destructivos es un equipo de ultrasonido industrial que hace uso de escaneo tipo A-Scan y B-Scan.

Este equipo se caracteriza por su fácil portabilidad, así como su rango de penetración que se encuentra entre 0 a 15,000 mm. Permite generar ondas ultrasónicas en un rango de velocidad entre los 100 hasta 20,000 m/s. De igual manera el equipo porta software que centra y facilita la inspección en normas como AWS y API. (SIUI, s.f.)

La página de la marca SIUI indica que el equipo opera con un rango de frecuencia entre 0.5 hasta 20 MHz.

El equipo hace uso de un rango de decibeles iniciando en 0 hasta 109.5 en pasos de incremento o decremento variable de 0.5, 2, 6 o 12 dB.

El equipo dispone de diferentes funciones que permiten la inspección de soldaduras, planchas y forjados con el uso de configuraciones ya incluidas en el equipo para realizar una configuración más sencilla con el fin agilizar la velocidad de inspección.

El equipo hace uso del transductor de haz recto con las siguientes características:

**Tabla 1.1.** Características de Sonda Dual del equipo SIUI Smartor (Ficha Técnica del equipo)

	<b>Smartor TGM5-10L</b>
Número de Elementos	1
Retraso de Sonda (us)	7,8
Frecuencia (MHz)	5
Conector	RT
Tipo de Cable	LEMO 00
Tamaño Cristal (mm)	10

## **Tipos de Presentación de Escaneo**

En el ultrasonido existe 4 formas principales en las cuales los distintos equipos presentan los datos obtenidos en el momento de la examinación. A su vez también existen presentaciones como L-Scan y D-Scan, pero en este trabajo no serán tomados en cuenta debido a su poco uso en el Laboratorio de Ensayos Destructivos.

### **A-Scan**

De todos los tipos de presentación que se pueden encontrar en la industria, el conocido como "A-Scan" es considerado como el más popular. Su presentación de datos se muestra en dos ejes, en el eje de las abscisas se muestra la profundidad de penetración que normalmente se encuentra en unidades milimétricas, a su vez en el eje de las ordenadas es posible encontrar lo que se conoce como la amplitud del eco de defecto. Es importante tomar en cuenta que la medición que se muestra en la presentación A-Scan es una medición puntual, lo que quiere decir que es la medición en la sección del tamaño del transductor.

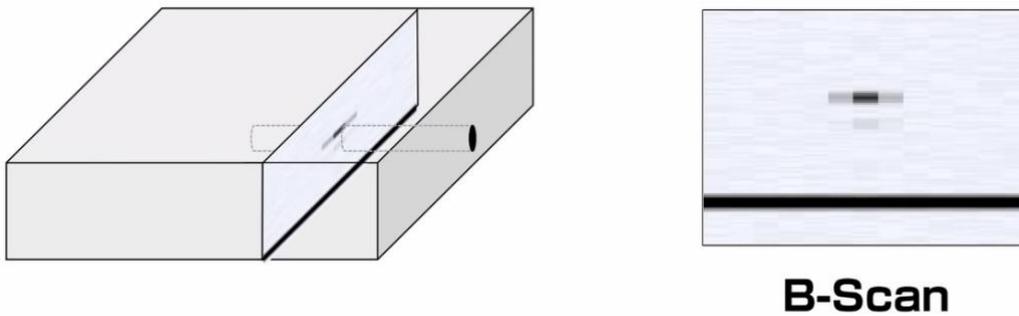
Las discontinuidades se presentan como picos que se encuentra entre el pulso de transmisión, valor que siempre se encuentra al inicio de las abscisas y se ignora ya que su existencia se debe a la superficie y el contacto con el acoplante ya que la densidad del acoplante es distinta a la del material por ende tienen diferentes velocidades, el eco de pared final, como es posible apreciar en la **Figura 1.6** que se puede verificar con la **Figura 1.9**.



**Figura 1.9.** Distintos picos encontrados en la función de análisis de Soldadura perteneciente al equipo Smartor UT (Fuente Propia)

### B-Scan

La información que se presenta en este tipo de presentación se puede considerar como una recolección en base a tiempo o distancia de los datos obtenidos en A-Scan. De simple manera si a la presentación A-Scan se le considera un punto, la presentación de B-Scan se puede observar como una línea a lo largo del material donde una discontinuidad se puede representar visualmente en relación con el eco de pared trasera.



**Figura 1.10.** Representación Visual de B-Scan (Holloway NDT & Engineering Inc., 2023)

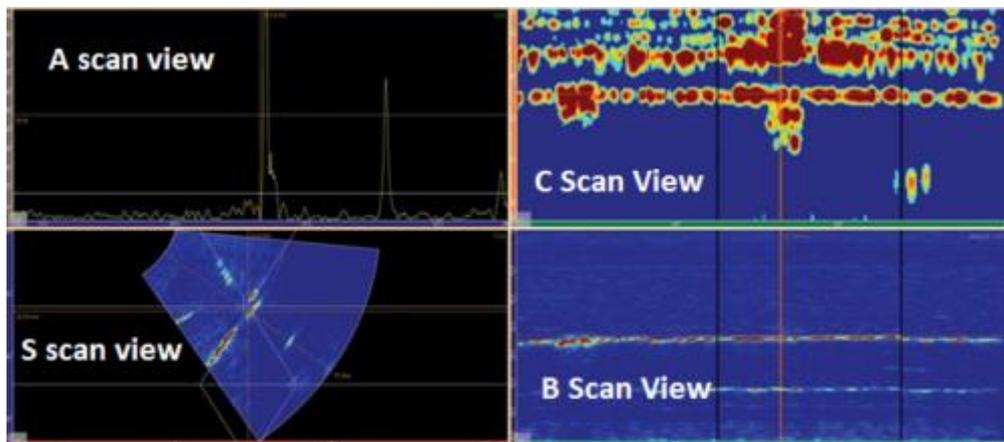
### C-Scan

Siguiendo el patrón que se presenta de A-Scan con B-Scan, se puede inferir que C-Scan es una compilación de varios B-Scan. Esta presentación de datos muestra un área donde normalmente se presentan las discontinuidades y defectos de forma apreciable con un contraste de diferentes colores, en este caso se utiliza un contraste de un color para sectores sin discontinuidades y otro para denotar los defectos. Existen equipos que presentan los sectores sin discontinuidades de color azul y los defectos de color rojo, pero esto varía entre operarios.

### S-Scan

La presentación S-Scan obtiene su nombre por ser el escaneo de un sector, se muestra de forma transversal y de manera bidimensional que hace referencia a la presentación A-Scan. En el eje de las abscisas se muestra el ancho del material a estudiar, en el eje de las ordenadas se encuentra la profundidad del material. Este tipo de presentación de datos se encuentra en equipamiento de ultrasonido multi elemento que normalmente se lo conoce como arreglo de fases. (Olympus Inspection Solutions, 2010)

A continuación, es posible observar los distintos tipos de escaneo de un mismo elemento.



**Figura 1.11.** Diferentes tipos de escaneo (*Publisher Team, 2022*)

## 2 METODOLOGÍA

Este capítulo proporciona una descripción detallada de los tipos de pernos susceptibles a este tipo de inspección. Se abordarán las propiedades del material y las imperfecciones que se introdujeron en los pernos. Además, se definirán las variables cruciales que serán empleadas en los análisis para la formulación de la metodología. Se ofrecerá una guía detallada sobre la configuración de los equipos utilizados en el proceso, culminando con la presentación de los resultados de las pruebas realizadas.

### Definición del tipo de perno por estudiar

Debido a las limitaciones en la forma del transductor, la inspección se restringirá a pernos con un diámetro mínimo. Esta restricción se fundamenta en el transductor del equipo Smartor UT, que tiene un diámetro de 10 mm. Para asegurar una toma de datos precisa y sin interferencias de otros tipos de discontinuidades, se requiere cierto grado de maniobrabilidad, logrado al tener un área superior a la cabeza del transductor. Por este motivo, se opta por pernos con un diámetro igual o mayor a 1 pulgada (25.4 mm). Además, es esencial que la superficie del perno sea plana para garantizar un contacto óptimo entre el transductor y la cabeza del perno. En este contexto, los pernos de cabeza hexagonal se consideran los más idóneos para la inspección. Los pernos empleados en el desarrollo del procedimiento son los siguientes:



**Figura 2.1.** Pernos utilizados para definir la metodología (Fuente Propia)

En la figura anterior se muestran los pernos que se utilizarán para establecer la metodología. Estos pernos tienen longitudes de 2.5 pulgadas, 5 pulgadas y 9 pulgadas en sentido descendente. Se emplearán pernos de diversas longitudes, manteniendo

constante el diámetro. Esta elección permitirá determinar posibles limitaciones en la inspección en función de la longitud, aclarando si la tarea de inspección se facilita en pernos más cortos y si no afecta a los pernos más alargados. Además, se destaca la presencia de dos pernos para cada longitud; de cada par, uno se utilizará como patrón de referencia, mientras que el otro se empleará para inducir discontinuidades y llevar a cabo las inspecciones correspondientes.

A continuación, se explicará el material de los pernos seleccionados para este trabajo. Así como bajo qué norma se encuentra y elementos importantes como las propiedades químicas y mecánicas que presentan los pernos seleccionados.

## Material

El material de los pernos varía según su clasificación, se determina en diferentes grados. Estos grados se identifican a través de marcas características en la cabeza de los pernos. Cada grado tiene diferentes propiedades químicas y mecánicas. A continuación, se presenta una tabla que detalla la clasificación y el material correspondiente de diferentes tipos de pernos:

Grade marking	Specification and material	Grade marking	Specification and material
 No mark	SAE grade 1 Low- or medium-carbon steel ASTM A307 Low-carbon steel SAE grade 2 Low- or medium-carbon steel		ASTM A354 grade BC Alloy steel, quenched and tempered
	SAE grade 5 ASTM A449 Medium-carbon steel, quenched and tempered		SAE grade 7 Medium-carbon alloy steel, quenched and tempered, roll-threaded after heat treatment
	SAE grade 5.2 Low-carbon martensite steel, quenched and tempered		SAE grade 8 Medium-carbon alloy steel, quenched and tempered ASTM A 354 grade BD Alloy steel, quenched and tempered
	ASTM A325 type 1 Medium-carbon steel, quenched and tempered; radial dashes optional		SAE grade 8.2 Low-carbon martensite steel, quenched and tempered
	ASTM A325 type 2 Low-carbon martensite steel, quenched and tempered		ASTM A490 type 1 Alloy steel, quenched and tempered
	ASTM A325 type 3 Atmospheric corrosion (weathering) steel, quenched and tempered		ASTM A490 type 3 Atmospheric corrosion (weathering) steel, quenched and tempered

**Figura 2.2.** Tabla de clasificación por grado del perno y el material que lo conforma.  
(Baumeister TSadegh AAvallone E, 2007)

En este trabajo se emplearán pernos de grado 8. Este tipo de pernos hacen uso de acero de contenido medio de carbono, se encuentra templado y revenido, de igual

manera se encuentra elaborado bajo la norma ASTM A354 en grado BD, para grado BD se tiene la siguiente composición química:

**Tabla 2.1.** Propiedades químicas de pernos grado BD (ASTM, A354 , 2017)

Elemento	Análisis Térmico, %	Análisis de Producto, %
Carbono	0.3-0.53	0.28-0.55
Manganeso, mínimo	0.6	0.570
Fósforo, máximo	0.035	0.04
Sulfuro, máximo	0.040	0.045
Boro, máximo	0.003	0.003

A su vez, las propiedades mecánicas de estos pernos bajo norma ASTM A354 son las siguientes:

**Tabla 2.2.** Requerimientos Mecánicas de pernos Grado BC y BD (ASTM, A354 , 2017)

Grado	Tamaño, in	Resistencia a la tracción, psi, min.	Resistencia a la tracción, psi, max.	Límite elástico, min, psi.	Elongación	Reducción de Área, min. %
BC	¼ hasta 2½, incluido	125 000	-	109 000	16	50
BC	Sobre 2½	115 000	-	99 000	16	45
BD	Todos los tamaños	150 000	173 000	130 000	14	40

La razón principal para optar por este material radica en que los pernos tipo hexagonal SAE Grado 8, disponibles comercialmente se pueden encontrar en gran variedad de diámetros y longitudes, como es en este caso se puede observar en la **Figura 2.1**.

### Preparación de los Pernos Patrón

Para la preparación de los pernos patrón y las probetas por analizar se realizaron dos procesos. El primero es la eliminación de la señalización de grado en la cara del perno, esto se realiza para poder tener una cara completamente plana sin obstrucciones ni elevaciones que afecten al contacto con el transductor.



**Figura 2.3.** Eliminación de marcas en la cabra del perno (a) perno con marcas y (b) perno esmerilado (Fuente Propia)

Para realizar la eliminación de marcas se hizo uso de un esmeril, dependiendo de la experticia del operario se puede obtener un mejor acabado, es importante que el acabado no presente desniveles. Esto desniveles afectarán a las mediciones y no permitirán que el transductor se acople de manera óptima a la superficie del perno. De esta manera se elimina un posible factor de error al momento de toma de datos, finalmente se recomienda realizar un galvanizado en frío para mantener la integridad superficial del perno, así como marcar el grado del perno ya que las marcas correspondientes se eliminaron.

Como segundo proceso, se incorporaron diversas imperfecciones a los pernos, estas imperfecciones se darán a conocer como Discontinuidades Inducida (D.I) destacando muescas de distintos tamaños en la sección roscada. Estas muescas buscan simular fisuras que se extienden a lo largo de los hilos en dirección al centro del eje del perno. Se realizan discontinuidades de diferentes profundidades para de esta manera observar la relación entre la profundidad de una fisura y la facilidad de localización de la fisura. A continuación, se presentan las probetas elaboradas para avanzar en el estudio:



**Figura 2.4.** Discontinuidades por estudiar, (a) muesca de profundidad 3.5 mm, (b) muesca de profundidad 1.75 mm en perno de 2.5 pulgadas.

En este estudio se dispone de un total de 7 pernos, 3 pernos de 2.5 pulgadas, 2 pernos de 5 pulgadas y 2 pernos de 9 pulgadas. De cada una de las longitudes es posible encontrar un perno sin discontinuidades que se utiliza como bloque patrón.

Se cuentan con dos pernos de 2.5 pulgadas (36.5 mm) que presentan discontinuidades. En la **Figura 2.4**, se puede observar al primer perno de 2.5 pulgadas designado como la "probeta 1", el cual presenta dos discontinuidades. Por otro lado, el segundo perno de 2.5 pulgadas se denomina la "probeta 2" y presenta tres discontinuidades a distintas distancias a lo largo del vástago roscado. Asimismo, la probeta 3 en el perno de 5 pulgadas (127 mm) se incorporaron dos discontinuidades, mientras que en la probeta número 4 correspondiente al perno de 9 pulgadas (228.6 mm) también se introdujeron dos discontinuidades.

**Tabla 2.3.** Localización de Discontinuidad Inducida en cada Probeta con su profundidad

Probeta	Longitud Perno (mm)	Número de D. I	Localización D.I (mm)	Profundidad de D.I (mm)
1	63,5	2	30,60	3,50
			48,24	1,75
2	63,5	3	24,32	3,00
			38,59	3,00
			50,91	2,70
3	141	2	87,53	1,70
			130,2	1,50
4	241	2	183,87	2,50
			229,38	1,75

En la **Tabla 2.3** es posible observar que la longitud de los pernos es más larga que la especificada en el párrafo anterior, estas mediciones se realizaron con un calibrador pie de rey, estas mediciones se pueden observar en **ANEXO I**

La profundidad de la discontinuidad hace indicación a la profundidad de la muesca desde el fondo de raíz hasta su máxima profundidad que atraviesa el eje de rotación del perno. En cambio, la localización se da midiendo desde la cabeza del perno hasta donde se encuentra discontinuidad. A continuación, se muestra gráficamente:



**Figura 2.5** Localización y profundidad de discontinuidad

## Variables

Para definir la metodología del equipo, se hicieron pruebas con los pernos de la **Figura 2.4** para realizar las pruebas correspondientes y obtener los datos necesarios para la sección de análisis de resultados.

Entre las variables por tomar en cuenta se encuentra la ganancia en decibeles (dB), se hará uso de la profundidad de la discontinuidad y la localización de las discontinuidades como se muestra en la **Tabla 2.3**, se observará la relación entre la ganancia del equipo con la amplitud que se presenta en el ensayo.

Como primer punto se tomarán en cuenta los valores de localización de las discontinuidades arrojados por el equipo para de esta manera observar el porcentaje de error que existe entre la medición real y la obtenida con el equipo. Esto se realiza para poder observar la precisión del equipo en la localización de las fisuras.

Como segundo punto se definirá la claridad con la que se pueden encontrar las discontinuidades, se estima que este parámetro depende de la profundidad de la fisura desde el filo del hilo en dirección al centro, de forma preliminar se espera que a mayor profundidad tenga la fisura mayor será la amplitud.

En el tercer punto, se abordó el ruido generado por el incremento de la ganancia en relación con la ubicación de la fisura. Se anticipa que a mayor profundidad se encuentre la discontinuidad, se requerirá un valor de ganancia más elevado, lo que a su vez generará un aumento en el ruido de fondo. Para evaluar el nivel de ruido, se tomará en cuenta el pico más prominente cercano al valor de profundidad a medir. No se considerará como ruido al valor de eco de fondo ni a aquellos valores pertenecientes a otras fisuras, en caso de que estas aparezcan en la medición.

## Configuración del Equipo

### Smartor

En esta sección se indicarán los pasos para la configuración del equipo, como hacer uso de los bloques patrón y los valores de decibeles usados para la configuración del equipo. A su vez, existen puntos a considerar previos a su configuración:

- Se hará uso del transductor TGM5-10L.
- Se utilizará un acoplante adecuado, optando por la glicerina en esta instancia.
- Cualquier calibración deberá realizarse en secciones alejadas de los hilos de rosca para que no exista posibles interferencias de ruido.

Para explicar los pasos de la calibración del equipo se hará uso de dos pernos, uno se hará uso como primera referencia uno de los pernos patrón que tiene el valor de longitud de perno de la **Tabla 2.3**, así como una cabeza otro perno que fue separado de su vástago para usar como segundo bloque de referencia con una longitud de 14 mm.



**Figura 2.6.** Perno utilizado para explicación de calibración

Al encender el equipo, el operario se encuentra con los apartados de Ultrasonido (UT) y Medición de Espesores (TG). El apartado de UT ofrece módulos para la inspección de soldaduras, asistente de forja, asistente de placas, B-Scan, AWS, CSC y API. Por otro lado, en el apartado de Medición de Espesores, se pueden realizar mediciones y gestionar datos, además de recopilar discontinuidades en el mismo equipo. Dado que

se busca una configuración sencilla para facilitar el uso a largo plazo, se opta por utilizar el apartado de Medición de Espesores.



Figura 2.7. Menú inicial equipo Smartor UT (Fuente Propia)

Al iniciar la operación, es esencial seleccionar la primera opción del equipo, que corresponde al transductor a utilizar. Desde la interfaz, se identifica la sección sobre el tipo de transductor en uso y el sistema asociado para gestionarlo. Estos dos aspectos deben coincidir para evitar posibles errores en los datos obtenidos durante cualquier ensayo. Además, se brinda la opción de cambiar el tipo de material a inspeccionar. Entre las opciones disponibles se encuentran diversos tipos de aceros, así como metales como aluminio, titanio, entre otros. Cabe destacar que se puede realizar una calibración con una velocidad de propagación del sonido personalizada, lo que permite trabajar con materiales distintos a los metales, siempre y cuando se conozca su velocidad de propagación del sonido. En este caso se puede configurar a un acero de medio carbono para facilitar la siguiente calibración.



**Figura 2.8.** Apartado de propiedades del transductor (Fuente Propia)

Al ingresa a cualquiera de estos menús es posible encontrar los datos pertenecientes al transductor, en este caso se muestran los datos del transductor en uso TGM5-10L.



**Figura 2.9.** Especificaciones del transductor (Fuente Propia)

En este menú es posible observar que la frecuencia de funcionamiento del transductor es de 5 MHz y tiene un diámetro de 10 mm. En esta sección se observa que es un transductor de doble elemento como el de la **Figura 1.1**.

En el menú de la puerta, se configura la altura y longitud de la "puerta A", marcada en color celeste, como se puede observar en la **Figura 2.8**. La puerta es un componente esencial del equipo que muestra el valor del pico más alto que atraviesa la misma. Esta función permite determinar la amplitud que el equipo muestra a una profundidad específica. La puerta se puede ubicar a alturas de amplitud entre el 10% y el 90%, y se debe posicionar en el pico deseado para realizar una medición precisa. Para mover la puerta o cambiar su longitud, se puede utilizar el botón con forma de pico atravesado por una línea con dos flechas a los lados, que se presenta a continuación:



**Figura 2.10.** Menú de puerta (Fuente Propia)

En el menú de control de la puerta, es esencial considerar primero el punto donde comienza la puerta, indicado como GASstart, seguido de la longitud de la puerta, denominada GAWidth. Se desaconseja utilizar una muestra mayor a 5 mm, ya que un tamaño de puerta más grande puede resultar en un gran número de datos, atravesando la puerta, lo cual podría generar valores no deseados. El siguiente parámetro es el rango, también conocido como Range según se muestra en la **Figura 2.10**. Este controla el rango de espesor que se va a analizar, siendo recomendable usar un rango que sea el doble del espécimen bajo estudio. Aunque en algunos casos, un rango muy amplio podría complicar la colocación de la puerta, y en tales situaciones, se puede reducir el rango para facilitar la colocación y lectura.

En el menú de calibración, se ofrecen diversas opciones para el tipo de calibración a llevar a cabo, se eligió en esta ocasión la calibración de velocidad más retardo (Vel+Dly). Se utilizaron como puntos de referencia las distancias mencionadas anteriormente de 141 mm y 15.5 mm. El orden de ingreso de las referencias en el equipo no tiene impacto, siempre y cuando la grabación de los valores sea en el mismo orden que se establecieron los valores de referencia.

Posteriormente, se procedió a ajustar el valor de ganancia. Aunque la ganancia máxima del equipo alcanza los 109.5 dB, se aconseja emplear valores iniciales de 55 dB para la calibración. En caso de que no sea posible visualizar el pico de amplitud, se puede

umentar la ganancia hasta que sea claramente visible y alcance un valor de amplitud del 80%, lo cual corresponde a la altura de la compuerta A en la pantalla del equipo.



**Figura 2.11.** Menú de Calibración del equipo (Fuente Propia)

Al colocar los valores de referencia para realizar la calibración, se preparo el perno utilizado como bloque patrón, a este se le coloca acoplante como se indica en la siguiente figura.



**Figura 2.12.** Colocación de acoplante en el perno (Fuente Propia)

Luego de colocar el acoplante se pone en contacto al transductor con la cabeza del perno lo que nos da el siguiente resultado:



**Figura 2.13.** Calibración del equipo para perno de 141 mm de longitud (Fuente Propia)

Al finalizar la grabación de ambas referencias, se presentará un mensaje que muestra si la calibración fue exitosa o fallida, al obtener una calibración exitosa se procede a confirmar la calibración del equipo al posicionar el transductor en la misma ubicación que las referencias. Este procedimiento debería arrojar valores de medición idénticos a los de las referencias. Asimismo, se observa que el valor de velocidad, situado al final de la pantalla, experimenta un cambio con respecto al valor inicial.

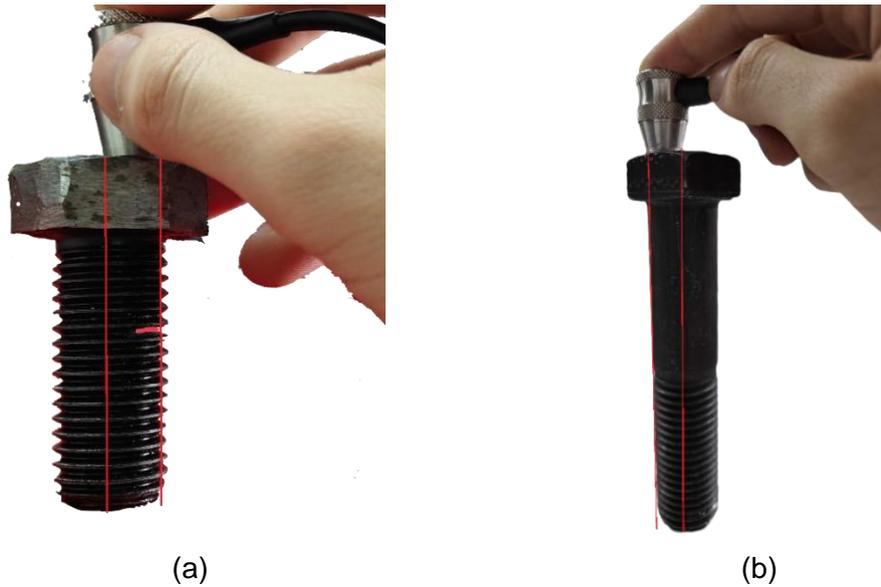
A continuación, se presentan los valores obtenidos de la velocidad de propagación del sonido por la calibración para cada una de las probetas:

**Tabla 2.4.** Velocidad de propagación del sonido en las probetas

Número de Probeta	Velocidad del Sonido (m/s)
1	5832
2	5870
3	5916
4	5899

## Ensayos de Ultrasonido

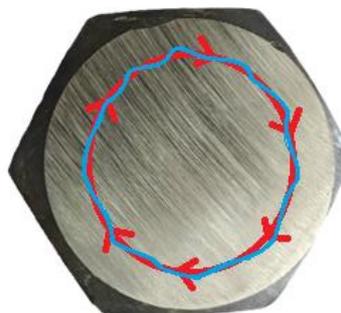
Con una calibración adecuada, se procede a realizar las pruebas a las probetas con discontinuidades, a continuación, se muestra la posición en la que se debe realizar las pruebas:



**Figura 2.14.** Posición para realizar las pruebas

En la **Figura 2.14** se ilustra, desde dos perspectivas, la adecuada colocación del transductor sobre la ubicación de la discontinuidad. En la imagen (a), se presenta la posición para la probeta de 2.5 pulgadas, y en la imagen (b), se aprecia la posición correspondiente a la probeta 3 de 5 pulgadas. En ambas imágenes, se destaca que el transductor se ubica directamente sobre las discontinuidades existentes, evidenciando la dirección de propagación de las ondas.

La dirección del movimiento del transductor a lo largo de la cabeza debe seguir la orientación de color rojo y el movimiento de color azul de la **Figura 2.15** para poder localizar las discontinuidades a lo largo de los hilos. Si se encuentran discontinuidades en el área interna de la circunferencia, se puede inferir que existen fisuras que se están propagando hacia el interior del perno. El área externa al círculo rojo mostrara valores pertenecientes al espesor de la cabeza del perno.



**Figura 2.15.** Movimiento del transductor sobre la cabeza del perno

Al realizar la inspección es posible encontrar los siguientes puntos:



**Figura 2.16.** Inspección de D.I 1, Probeta 1 (Fuente Propia)

Se pueden identificar seis puntos de alta relevancia, siendo el más destacado el valor de amplitud. Para la discontinuidad ubicada a 30.56 mm, con una ganancia de 57.5 dB, se obtiene una amplitud de 78%, según los datos proporcionados por el equipo. Además, se observa que el nivel de ruido alrededor del pico es mínimo, aproximándose a valores cercanos al 3%. Otros picos significativos incluyen el valor correspondiente a la segunda discontinuidad, que comienza a manifestarse alrededor de los 50 mm, así como el eco de la pared trasera cerca de los 64 mm y el eco del espesor de la cabeza del perno, que se presenta alrededor de los 15 mm.

Existen otros casos en el que los valores de amplitud se encuentran con un alto valor de ruido cercano, a continuación, se presenta el caso de la D.I 1, probeta 3:



**Figura 2.17.** Inspección la D.I 1, probeta 3 (Fuente Propia)

Con una profundidad hasta la discontinuidad de 87.53 mm es posible encontrar que existe un valor de amplitud de 28% con valores de ruido cercanos al 22%, estos valores de ruido se pueden confundir con otro tipo de discontinuidades. En el apartado de análisis se explicará las razones de esto.

El caso más difícil de diferenciar se da en la probeta 4, a continuación se muestra la inspección realizada con una ganancia de 78 dB.



**Figura 2.18.** Inspección D.I 2, Probeta 4 (Fuente Propia)

En esta probeta se muestran 4 picos seguidos entre los valores de 170 mm hasta los 240 mm. De izquierda a derecha estos picos representan la discontinuidad 1 en un valor aproximado de 184 mm señalada de color rojo, un valor de ruido próximo a los 210 mm señalada de color celeste, el valor de la discontinuidad 2 en un valor próximo a los 224 mm igualmente señalada de color rojo seguido del eco de pared trasera en un valor de 241 mm señalada de color naranja para una mejor apreciación.

### 3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 3.1 Resultados

En este apartado se presentarán los datos obtenidos en cada examinación, así como en qué casos las fisuras llegan a ser más notables y cuando no es posible de diferenciarlas.

Como primer punto se observan los tipos de discontinuidades que se pudieron identificar, debido a que existe una relación entre la localización de la fisura y el valor de profundidad que esta atraviesa. A continuación se presentan los siguientes datos:

**Tabla 3.1.** Relación de Detectabilidad en relación con su profundidad

Probeta	Número de D.I	Localización de D.I (mm)	Profundidad de D.I (mm)	Visibilidad
1	D.I 1	30,6	3,5	Detectable
	D.I 2	48,24	1,75	Detectable
2	D.I 1	24,32	3	Detectable
	D.I 2	38,59	3	Detectable
	D.I 3	50,91	2,7	Detectable
3	D.I 1	87,53	1,7	Detectable
	D.I 2	130,2	1,50	No Detectable
	D.I 2		3	Detectable
4	D.I 1	183,87	2,50	No Detectable
	D.I 1		3,5	Detectable
	D.I 2	229,38	1,75	No Detectable
	D.I 2		3,5	Detectable

Los datos revelan que la localización indicaciones de menor profundidad se vuelve más desafiante a medida que la profundidad aumenta. Se pueden examinar con detalle las discontinuidades que se encuentran a profundidades de 1.7 mm hasta aproximadamente 90 mm. Sin embargo, al acercarse a los 130 mm, las discontinuidades con profundidades menores a 3 mm ya no son fácilmente discernibles. Esto ocurre en el caso de la probeta 3 que se puede comparar en los **ANEXO IV**

y

## ANEXO V

pertenecientes a dicha discontinuidades.

Es posible observar que una tendencia, a medida que aumenta la localización de la discontinuidad es necesario tener una mayor profundidad de discontinuidad para lograr ser detectada. Las discontinuidades pertenecientes a la probeta 3 comienzan a mostrar falta de detectabilidad para discontinuidades menos a una profundidad de 1.5 mm desde la localización de 130 mm. Por otro lado, son detectables cuando su profundidad aumenta a 3 mm.

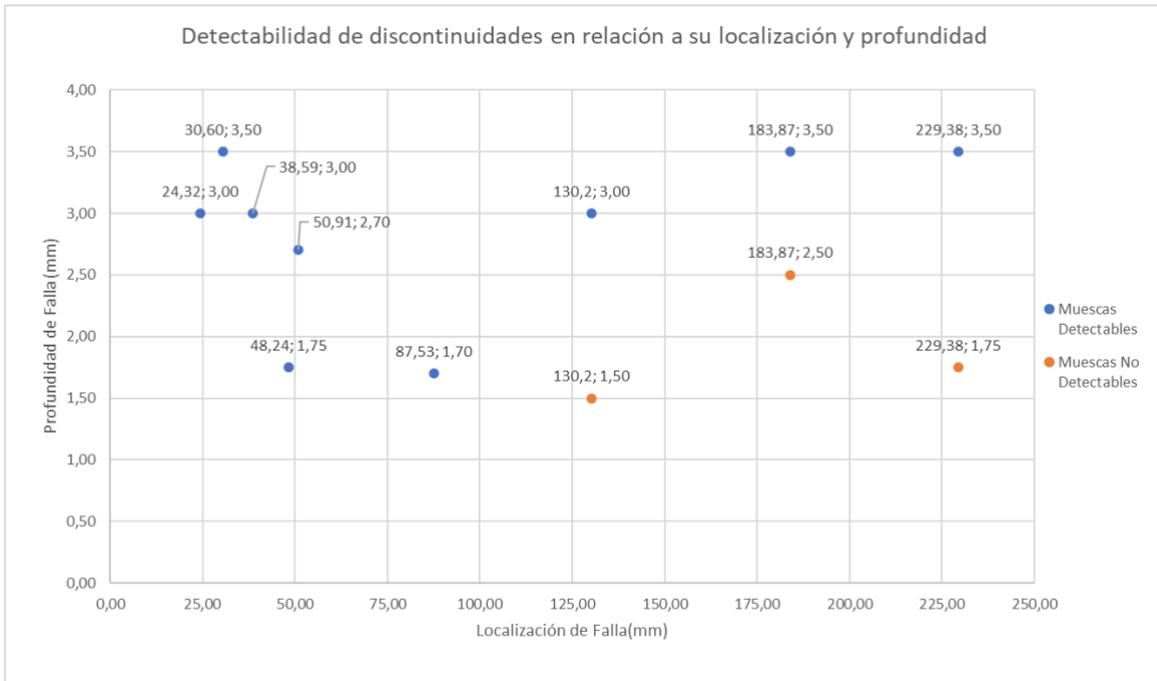
Esta tendencia continua con una fisura de 2.5 mm de profundidad a una distancia de aproximadamente 184 mm, que no es apreciable hasta que se introduce una discontinuidad con una profundidad de 3.5 mm perteneciente a la probeta 4. Como se puede comparar entre los **ANEXO VI**

y

## ANEXO VII

pertenecientes a dicha discontinuidades. Esto quiere decir que a mayor profundidad se imposibilita el análisis de falla minúsculas, se debe de tener un incremento de profundidad de la discontinuidad para que se vuelva visible en el ensayo de ultrasonido a medida que aumenta la localización de la discontinuidad.

Es importante señalar que la **Tabla 3.1** presenta alteraciones con respecto a la **Tabla 2.3**, ya que los valores iniciales para la discontinuidad 2 de la probeta 3 y ambas discontinuidades de la probeta 4 no eran claramente distinguibles como se explica anteriormente. Esta relación se puede apreciar de mejor manera en la **Figura 3.1** a continuación:



**Figura 3.1.** Relación de detectabilidad.

Haciendo uso de las muescas visibles se obtienen las siguientes relaciones entre los valores de decibeles con la penetración del equipo, el valor de amplitud y el valor de ruido producido.

Para las discontinuidades de la Probeta 1 se tiene lo siguiente:

**Tabla 3.2.** Probeta 1, D.I. 1 en 30,60 mm con una profundidad de 3.5 mm

Decibeles (dB)	Penetración (mm)	Error	Amplitud (%)	Ruido (%)
57,5	30,56	0,13%	78	3
58,5	30,48	0,39%	75	5
59,5	30,51	0,29%	82	5
60,5	30,49	0,36%	85	5
61,5	30,5	0,33%	90	8

**Tabla 3.3.** Probeta 1, D.I. 2 en 48.24 mm con una profundidad de 1.75 mm

Decibeles (dB)	Penetración (mm)	Error	Amplitud (%)	Ruido (%)
64,5	47,9	0,70%	22	7
65,5	48	0,50%	28	7

66,5	48,05	0,39%	30	8
67,5	48,03	0,44%	33	8
68,5	47,99	0,52%	40	11

Tanto para la **Tabla 3.2** como para la

**Tabla 3.3** se recogieron datos que se muestran en la **Figura 2.16**, el valor de error es una medida que se calcula en relación con el valor real de la discontinuidad. Este procedimiento se realiza a los demás valores obtenido, valores que se presentan a continuación:

**Tabla 3.4.** Datos de inspección de ultrasonido

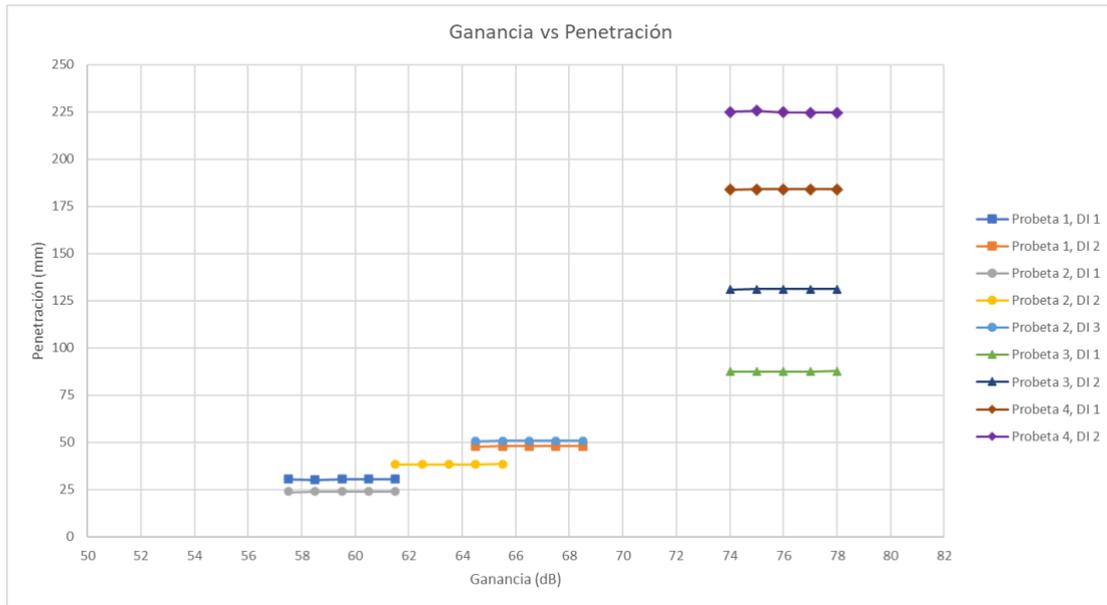
Probeta	D.I.	Decibeles (dB)	Penetración (mm)	Error	Amplitud (%)	Ruido (%)
1	1	57,5	30,56	0,13%	75	3
		58,5	30,48	0,39%	78	5
		59,5	30,51	0,29%	82	5
		60,5	30,49	0,36%	85	5
		61,5	30,5	0,33%	90	8
	2	64,5	47,9	0,70%	22	7
		65,5	48	0,50%	28	7
		66,5	48,05	0,39%	30	8
		67,5	48,03	0,44%	33	8
		68,5	47,99	0,52%	40	11
2	1	57,5	23,96	1,48%	50	5
		58,5	23,99	1,36%	56	6
		59,5	23,98	1,40%	67	5
		60,5	23,98	1,40%	73	8
		61,5	23,99	1,36%	82	8
	2	61,5	38,4	0,49%	37	3
		62,5	38,45	0,36%	43	4
		63,5	38,46	0,34%	49	4
		64,5	38,46	0,34%	58	5
		65,5	38,51	0,21%	66	5
	3	64,5	50,71	0,39%	37	5
		65,5	50,78	0,26%	46	5

		66,5	50,78	0,26%	56	5
		67,5	50,77	0,27%	68	6
		68,5	50,84	0,14%	82	8
3	1	74	87,57	0,05%	14	10
		75	87,57	0,05%	16	15
		76	87,59	0,07%	20	15
		77	87,60	0,08%	25	18
		78	87,66	0,15%	28	22
	2	74	131,1	0,69%	61	15
		75	131,12	0,71%	72	20
		76	131,14	0,72%	82	20
		77	131,14	0,72%	95	22
		78	131,18	0,75%	100	23
4	1	74	183,97	0,05%	21	32
		75	184	0,07%	31	43
		76	184,06	0,10%	37	53
		77	184,09	0,12%	49	67
		78	184,11	0,13%	65	80
	2	74	225,06	1,88%	61	20
		75	225,58	1,66%	69	25
		76	224,72	2,03%	74	30
		77	224,58	2,09%	84	40
		78	224,57	2,10%	92	44

*Desde este punto se tratarán y analizarán las relaciones entre los datos obtenidos de la*

**Tabla 3.4**, se abarcarán cuatro puntos en específico. Los tres primeros puntos son los descritos en **Variables**

El último punto será la relación entre la amplitud y el ruido en cada probeta. Para facilitar la lectura de las gráficas se representan a los valores pertenecientes a la probeta 1 con un cuadrado; a los valores de la probeta 2 con un círculo; los de la probeta 3 con un triángulo; y, finalmente a los de la probeta 4 con un romboide.



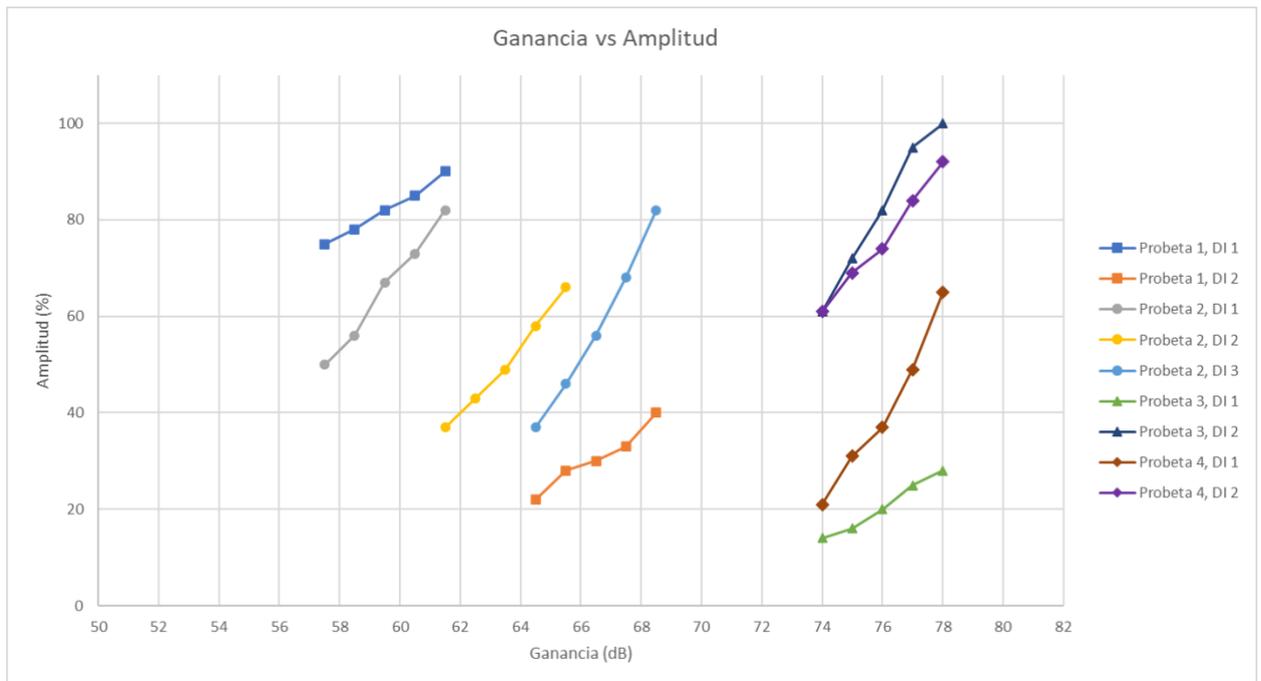
**Figura 3.2.** Relación ganancia y Penetración

Esta relación destaca que los valores iniciales de ganancia, establecidos en 57.5 dB, permiten una captura de datos constante y sin fluctuaciones. No obstante, también se observa una tendencia: las discontinuidades más superficiales, como la discontinuidad 1 de la probeta 1 y la discontinuidad 1 de la probeta 2, requieren menor aumento de ganancia para de igual manera obtener datos claramente visibles. Se evidencia la necesidad de incrementar la ganancia del equipo para detectar discontinuidades más profundas, como la discontinuidad 2 de la probeta 1 y el resto de las discontinuidades de la probeta 2.

Según la información recopilada en la parte izquierda de la gráfica, se establece que para identificar discontinuidades en ubicaciones que van desde menos de 25 mm hasta 50 mm, se recomienda utilizar valores de ganancia comprendidos entre 55 dB y 58 dB. Dependiendo de la profundidad de la discontinuidad presente considerando la **Tabla 3.1**, es factible detectar defectos con una profundidad mínima de 1.75 mm. Al considerar la relación representada en la **Figura 3.3** más adelante, se puede inferir que la detección de discontinuidades con profundidades inferiores a 1.75 mm también es posible.

En el lado derecho de la gráfica, se observa que para identificar discontinuidades en un rango de aproximadamente 90 mm hasta los 225 mm, se recomienda utilizar ganancias en el rango de 74 a 78 dB. La tendencia de cual valor es recomendable para este rango de penetración se observará más adelante al ver las relaciones decibeles y amplitud, así como decibeles y ruido.

Siguiendo lo dicho anteriormente se prosigue a la siguiente relación:



**Figura 3.3.** Relación ganancia y amplitud del equipo

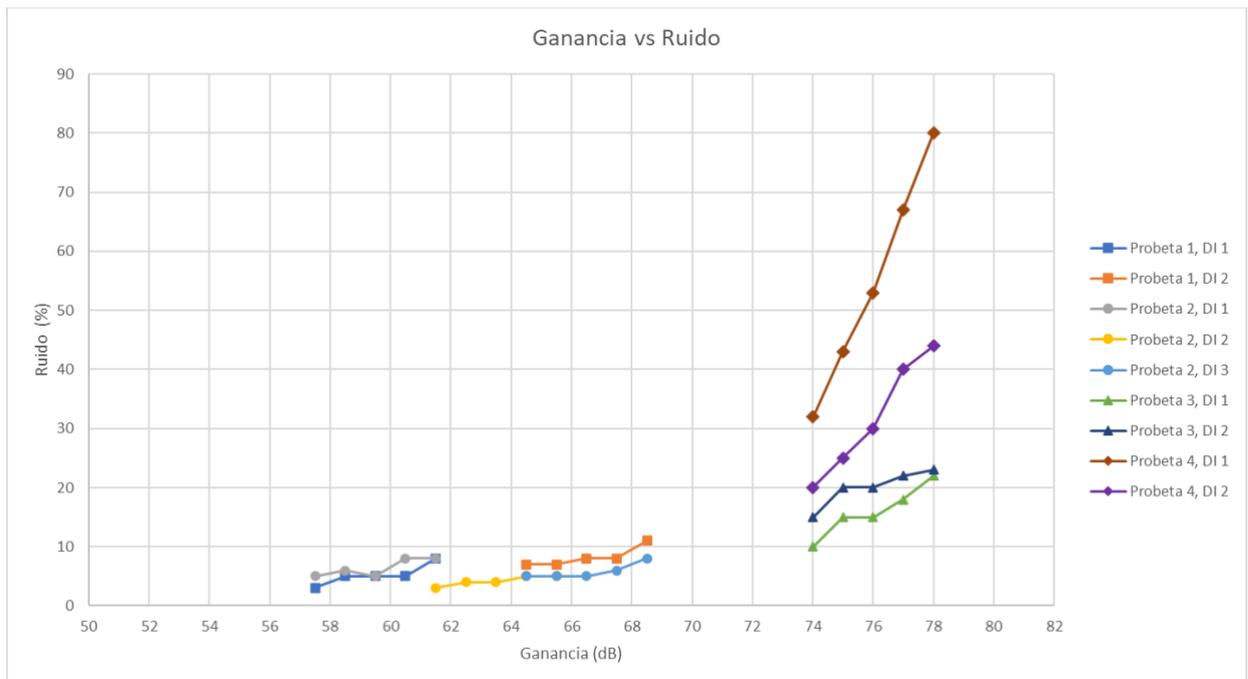
En esta etapa, se destaca que las indicaciones superficiales de la discontinuidad 1 de la probeta 1 y de la discontinuidad 1 de la probeta 2, muestran los resultados más favorables. Estas manifestaciones exhiben una alta amplitud con un bajo valor de ganancia, indicando una toma de datos sin ruido o con valores de ruido muy bajos. Es importante señalar que estas discontinuidades tienen profundidades de 3.5 mm y 3 mm, respectivamente.

En el rango de ganancias entre 60 dB y 70 dB, se observa que la discontinuidad 2 de la probeta 1 presenta valores bajos de ganancia en comparación con los de la discontinuidad 3 de la probeta 2, a pesar de estar ubicadas muy cercanas, a 48.24 mm y 50.91 mm, respectivamente. Esto se relaciona con la profundidad de cada discontinuidad, siendo 1.75 mm y 2.7 mm, respectivamente. Esto implica que a menor profundidad de la discontinuidad, menor será la amplitud del eco mostrada en el equipo.

Para valores de ganancia superiores a 70 dB, se observa la discontinuidad 1 de la probeta 3, localizada a 87.52 mm, con valores iniciales de amplitud inferiores al 20% con una ganancia de 74 dB, debido a la profundidad de la discontinuidad de 1.7 mm. Asimismo, se registran valores similares para la discontinuidad 1 de la probeta 4, con una amplitud inicial no mayor al 20% y una ganancia de 74 dB. No obstante, esta última tiene una profundidad de 3.5 mm, casi el doble que la anterior. Aunque presentan valores iniciales similares, esto refleja la relación directa de la amplitud entre la localización de la discontinuidad y su profundidad.

Esta relación se evidencia en la discontinuidad 2 de la probeta 3 y la discontinuidad 2 de la probeta 4, ambas con profundidades de 3 mm y 3.5 mm, respectivamente. Con estas profundidades, se observa que incluso comenzando en los 74 dB, la amplitud inicial es de al menos el 60%. Cabe recalcar que los valores iniciales de estudio de profundidad de estas discontinuidades de 1.5 mm y 1.75 mm respectivamente no mostraron valores de amplitud y no se pudo realizar su estudio.

Se prosigue con el siguiente punto:



**Figura 3.4.** Relación ganancia y ruido

De igual manera que en las anteriores Figuras, en los valores menores a 62 dB de ganancia es posible observar a las discontinuidades más superficiales, discontinuidad 1 de la probeta 1 y discontinuidad 1 de la probeta 2, como se esperaba, al hacer uso de valores bajos de ganancia el ruido producido es menos al 10% y complementando la relación ganancia y amplitud de la **Figura 3.3** que ronda en valores entre 75 hasta 90% para la discontinuidad 1 de la probeta 1 y valores entre 50% hasta 82% para la discontinuidad 1 de la probeta 2.

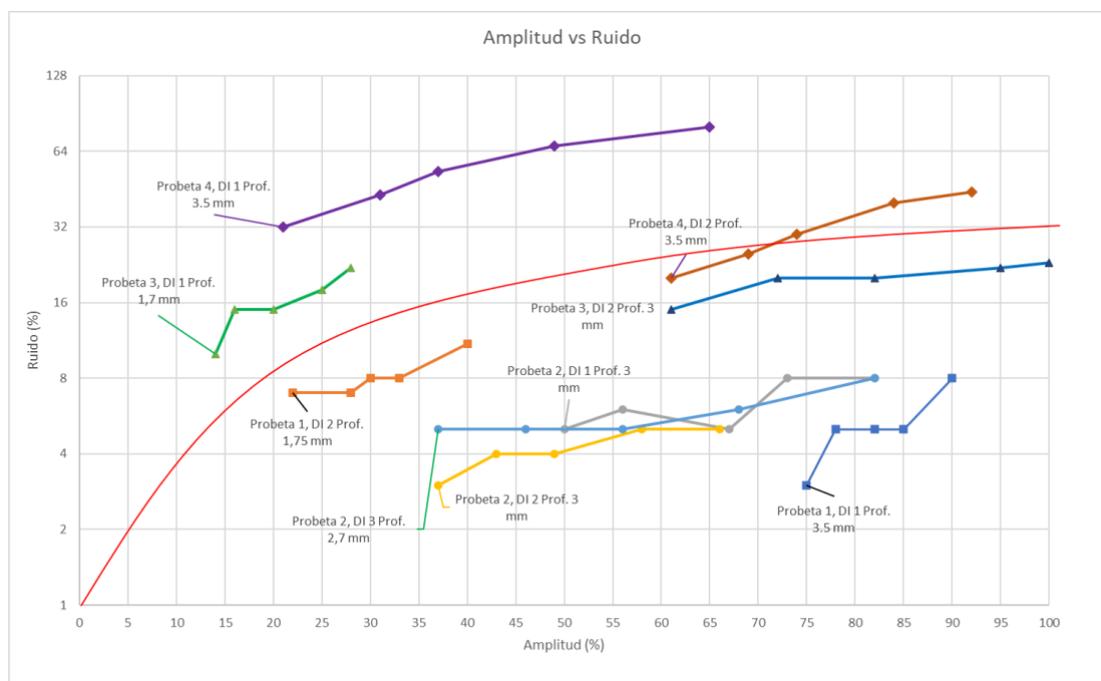
Lo más notable es el valor de ruido de la discontinuidad 1 de la probeta 4, valores de ruido que empiezan en un 32% y llegan hasta el 80% aun siendo que sus valores de amplitud empiezan en el 21% y llegan hasta el 60%, esto muestra que un operario que hace la inspección de un perno ya instalado puede confundir la localización de este ruido con el valor real de la discontinuidad, esto se puede observar gráficamente en el

## ANEXO VII

Esto tiene relación con la profundidad de la discontinuidad, valor de 2.5 mm, ya que para la discontinuidad 2 de la probeta 4 que tiene una profundidad de 3.5 mm se presenta una amplitud inicial de 61% hasta 95% y un valor de ruido inicial 20% hasta 44%, pero se debe tomar en consideración que existe un valor de error de aproximadamente 2% en relación al valor real de la localización, valor que para discontinuidad 1 de la probeta 4 ronda entre 0.05% y 0.13%, valores que se pueden observar en la

**Tabla 3.4.** Esto indica que llegando a esta profundidad comienza a producirse un error general de la localización de la discontinuidad.

Finalmente, en el cuarto punto, uno de los primeros aspectos a considerar es la escala de la gráfica. Se optó por utilizar una escala logarítmica base 2 en el eje correspondiente al valor de ruido para mejorar la presentación de los datos, dado la considerable disparidad en el nivel de ruido entre algunas de las probetas. Además, se abreviaron los nombres de cada discontinuidad; por ejemplo, la discontinuidad 1 de la probeta 1 se representa como P1D.I.1. Esta simplificación se lleva a cabo para incorporar el nombre de la discontinuidad, su localización y la profundidad correspondiente, representados en la **Figura 2.5**, permitiendo así observar la relación específica en cada caso. Se puede observar que la gráfica se encuentra dividida en dos partes, la relación entre la amplitud y ruido para cada una de las probetas se presenta a continuación:



**Figura 3.5.** Relación Amplitud y Ruido generado

La gráfica está dividida en dos partes: la parte superior, donde se encuentran las discontinuidades P3D.I.1 y P4D.I.1. Estas discontinuidades se consideran las más

difíciles de distinguir debido a su elevada relación amplitud/ruido. Esta relación se calcula dividiendo el valor de la amplitud entre el valor del ruido correspondiente, obteniendo una relación que, en el caso de P3D.I.1, comienza en 1.4 y termina en valores cercanos a 1.3. Esta proximidad de valores puede conducir a una posible confusión en la detección de la discontinuidad. Al comparar esta relación con la de una probeta con menos ruido, como P1D.I.1, que inicia con una relación de 25 y termina con 11.3, se evidencia que una relación amplitud/ruido más elevado facilita la detección de la existencia de una discontinuidad.

Debido a esto se puede considerar que, cuando la relación amplitud/ruido es elevada, se podrá observar de mejor manera la existencia de una discontinuidad. Esto se puede demostrar al comparar los valores de pico y ruido pertenecientes a la **Figura 2.16** y **Figura 2.18**.

La representación de valores más claros se encuentra en la parte inferior derecha de la gráfica, mientras que las presentaciones más difíciles de comprender y examinar se sitúan más arriba en dirección al lado izquierdo. La línea roja se utiliza para marcar la división entre estos dos tipos de presentaciones. En el caso de P4F2, se observa una transición entre ambos y un alto margen de error, con una relación que disminuye de un valor inicial de 3.1 a un valor final de 2.1. Para obtener más detalles sobre esta relación, se puede consultar el **ANEXO IX**

## 3.2 Conclusiones

El objetivo general de diseñar un procedimiento para la inspección de pernos mediante técnicas de ultrasonido se ha alcanzado satisfactoriamente. Además, se logró identificar las discontinuidades que pueden ser fácilmente detectadas, aquellas que pueden ser confundidas con el ruido de fondo y las que resultan imposibles de determinar con la tecnología empleada. Es destacable que la localización de las discontinuidades se logra con un margen de error significativamente bajo, situándose en el mejor de los casos en un error no mayor al 0.05% del valor real. En situaciones menos favorables, se puede presentar un error de hasta un 2.10%.

Se desarrollaron patrones de inspección específicos para diferentes longitudes de pernos, integrando discontinuidades diseñadas estratégicamente para facilitar su detección mediante equipos de ultrasonido. Estos patrones se erigen como herramientas cruciales para guiar a los operadores en la inspección de pernos, una tarea

que, aunque a veces subestimada, destaca por su importancia en la integridad estructural. El análisis detallado de estos patrones permite discernir una variedad de escenarios, desde la identificación clara de discontinuidades hasta situaciones en las que la visualización de ciertos tipos de discontinuidades está limitada.

Al examinar localizaciones más allá de los 90 mm, se concluye que la profundidad de las discontinuidades debe ser superior a 2 mm para evitar posibles confusiones con el eco generado por los hilos del vástago del perno. Este hallazgo subraya que, a medida que la localización se aleja de la cabeza del perno, la profundidad de las discontinuidades debe incrementarse para garantizar una detección precisa y clara. Estas conclusiones son fundamentales para optimizar la metodología de inspección y asegurar la eficacia en la detección de discontinuidades en pernos de diversas longitudes.

La relación observada entre los valores iniciales de ganancia (57.5 dB) y la captura de datos constante destaca la necesidad de ajustar la ganancia para detectar discontinuidades más profundas, indicando la importancia de considerar patrones específicos en la metodología de inspección

La correlación entre los valores de ganancia y la detección eficiente de discontinuidades destaca la importancia de integrar esta relación en el protocolo paso a paso, proporcionando directrices claras para ajustar la ganancia según la profundidad y ubicación de las discontinuidades. La observación de la relación entre ganancia y amplitud para diferentes discontinuidades destaca la relevancia de incluir en el protocolo pasos que permitan interpretar de manera precisa las señales ultrasónicas y garantizar una inspección eficiente.

La incorporación de normas que emplean diversos enfoques de estudios en ultrasonido facilita su implementación y desarrollo, posibilitando la detección eficiente de discontinuidades. Estas normas desempeñan un papel crucial al proporcionar un entendimiento integral del estado del elemento bajo estudio. La adopción y aplicación de estas normas no solo contribuyen a la eficacia en la detección de discontinuidades, sino que también enriquecen la comprensión general de la condición estructural del material inspeccionado. Este enfoque estandarizado se revela como una herramienta esencial para asegurar la eficiencia y precisión en la evaluación de componentes mediante técnicas de ultrasonido.

### **3.3 Recomendaciones**

Es aconsejable emplear diversos tipos de transductores, los cuales pueden operar a distintas frecuencias. Esta variedad permite determinar qué tipo de transductor facilita la detección de ciertas discontinuidades con mayor eficacia.

Al concluir la toma de datos, se recomienda recubrir la superficie del perno con una solución de galvanizado en frío, como se hizo en este estudio. Este procedimiento contribuye a preservar la integridad del perno a lo largo del tiempo y asegurar su durabilidad.

Es aconsejable tener conocimiento de las dimensiones iniciales de los pernos bajo estudio, especialmente si ya están instalados. En caso de ser factible, lo óptimo sería contar con una muestra del mismo tipo de perno para utilizarla como patrón de calibración.

Cabe señalar que la destreza y experiencia del operario, así como el tipo de equipo utilizado, pueden contribuir a la reducción de este margen de error. Al permitir a un operario con mayor experiencia realizar el estudio es posible visualizar con mayor facilidad discontinuidades, a su vez disminuyendo los posibles errores y picos de ruido no deseados

## 4 BIBLIOGRAFÍA

- Academia Testek. (s.f.). *Capítulo 3: Equipo de Inspección - Academia Grupo Testek*. Obtenido de Academia Grupo Testek: <https://academy.testekndt.net/ndtpeglosario-industrial/capitulo-3-equipo-de-inspeccion/>
- ASTM . (2020). F788. *Standard Specification for Surface Discontinuities of Bolts, Screws, Studs, and Rivet Inch and Metric Series*. ASTM.
- ASTM. (2017). A354 . "Standard Specification for Quenched and Tempered Alloy Steel Bolts, Studs, and Other Externally Threaded Fasteners". U.S.: ASTM.
- ASTM. (2020). E114 – 20. "Standard Practice for Ultrasonic Pulse-Echo Straight-Beam Contact Testing1".
- ASTM. (2020). E1685 – 20 . "Standard Practice for Measuring the Change in Length of Bolts Using the Ultrasonic Pulse-Echo Technique".
- ASTM. (2020). E587 – 15 . (Reapproved 2020) "Standard Practice for Ultrasonic Angle-Beam Contact Testing".
- ASTM. (2021). A563/A563M. "Standard Specification for Carbon and Alloy Steel Nuts (Inch and Metric)".
- ASTM. (2023). E1316-23 . "Standar Terminology for Nondestructive Examinations".
- ASTM. (s.f.). *Handbook of Reference Data for Nondestructive Testing*. (L. Mordfin, Ed.)
- Baumeister TSadegh AAvallone E. (2007). *Marks' standard handbook for mechanical engineers*. New York: McGraw-Hill.
- Gallego-Juárez, J. A. (1999). *HIGHPOW RPOW RULTRASONIC TRANSDUCERSULTRASONIC TRANSDUCER*. España: Kluwer Academic Publishers.
- GLS. (s.f.). *SIUI - SMARTOR UT - Global Supply Logistic*. Obtenido de Global Supply Logistic: <https://gsl-ndt.pe/producto/siui-smartor-ut/>
- Grosser, P. (2017). Ultrasonic Inspection of Bolts, Pins and Shafts. *15th Asia Pacific Conference for Non-Destructive Testing* .
- Hellier, C. (2001). *HANDBOOK OF NONDESTRUCTIVE EVALUATION*. McGRAW-HILL.
- Holloway NDT & Engineering Inc. (19 de 02 de 2023). *Ultrasonic A/B/C-scans*. Obtenido de Youtube: [https://www.youtube.com/watch?v=7\\_gUYKqVrN4](https://www.youtube.com/watch?v=7_gUYKqVrN4)
- IAEA. (1988). *ULTRASONIC TESTING OF MATERIALS AT LEVEL 2*. VIENNA: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY.
- Iowa State University . (s.f.). *Ultrasound*. Obtenido de Nondestructive Evaluation Techniques : <https://www.nde-ed.org/NDETechniques/Ultrasonics/EquipmentTrans/transducertypes.xhtml>
- OLYMPUS. (2022). Inspecting the Soundness of High-Strength Bolts Using Phased Array Ultrasound and TFM. Obtenido de <https://www.olympus-ims.com/en/insight/>

- Olympus Inspection Solutions. (2010). *Presentación de la inspección ultrasónica | Olympus IMS*. Obtenido de Olympus Inspection Solutions—NDT, Microscopes, XRF, RVI: <https://www.olympus-ims.com/es/ndt-tutorials/intro/ut/>
- Olympus. (s.f.). *Olympus IMS*. Obtenido de Velocidades acústicas del material: <https://www.olympus-ims.com/es/ndt-tutorials/thickness-gauge/appendices-velocities/>
- Ping, Z., Jiachun, L., Yu, Z., & Jiaxiao, L. (2023). Crack propagation analysis and fatigue life assessment of high-strength bolts based on fracture mechanics. *Nature*, 1-19.
- PRAKASH, R. (2009). *Non -Destructive Testing Techniques*. New Academic Sci. Publisher Team. (07 de 02 de 2022). *Advanced Ultrasonic Testing Methods*. Obtenido de OnestopNDT: <https://www.onestopndt.com/ndt-articles/advanced-ultrasonic-testing-methods-1>
- RAE. (17 de 12 de 2023). *Real Academia Española*. Obtenido de Real Academia Española: <https://dle.rae.es/capilaridad>
- Reid, D. J. (Enero de 2016). Ultrasonic Testing of Bolts and Pins: Longitudinal Beam Review. *The NDT Technician*, 15(1), 16.
- Reid, D. J. (Enero de 2020). Ultrasonic Testing of Anchor Bolts. *The NDT Technician*, 19(1), 16.
- S. Lin, Hiroyuki Fukutomi. (s.f.). *INVESTIGATION OF DETECTABILITY OF CRACKS IN ANCHOR BOLTS FOR APPLICATION OF PHASED ARRAY ULTRASONIC TESTING*. JAPON: Central Research Institute of Electric Power Industry.
- SIUI. (s.f.). *SIUI Smartor Digital Ultrasonic Falw Detector & Thickness Gauge*. Obtenido de SIUI: <http://www.siui.com/ax2/a/chanpinzhongxin/wusunjiance/20180131/189.html>
- YOUNG, H. D. (2009). *Física universitaria volumen 1*. (Decimosegunda edición ed.). México: PEARSON EDUCACIÓN.

## 5 ANEXOS

### ANEXO I

Medición de probeta 1, perno de 2.5 pulgadas.



### ANEXO II

Medición de probeta 3, perno de 5 pulgadas.



### ANEXO III

Medición de probeta 4, perno de 9 pulgadas.



### ANEXO IV

Medición de probeta 3. D.I. 2 de profundidad de 1.5 mm a 74 dB.



## ANEXO V

Medición de probeta 3. D.I. 2 de profundidad de 1.5 mm a 74 dB.



## ANEXO VI

Medición de probeta 4. D.I. 1 de profundidad de 2.5 mm a 81 dB.



## ANEXO VII

Medición de probeta 4. D.I. 1 de profundidad de 3.5 mm a 75 dB.



## ANEXO VIII

Existencia de mayor cantidad de ruido en D.I. 1 de la Probeta 4 (izquierda) que en la falla 2 de la probeta 4 (derecha)



## ANEXO IX

Tabla de Relación Amplitud/Ruido

Probeta	Falla	Amplitud (%)	Ruido (%)	A/R
1	1	75	3	25,0
		78	5	15,6
		82	5	16,4
		85	5	17,0
		90	8	11,3
	2	22	7	3,1
		28	7	4,0
		30	8	3,8
		33	8	4,1
		40	11	3,6

2	1	50	5	10,0	
		56	6	9,3	
		67	5	13,4	
		73	8	9,1	
		82	8	10,3	
	2	2	37	3	12,3
			43	4	10,8
			49	4	12,3
			58	5	11,6
			66	5	13,2
	3	3	37	5	7,4
			46	5	9,2
			56	5	11,2
			68	6	11,3
			82	8	10,3
3	1	14	10	1,4	
		16	15	1,1	
		20	15	1,3	
		25	18	1,4	
		28	22	1,3	
	2	2	61	15	4,1
			72	20	3,6
			82	20	4,1
			95	22	4,3
			100	23	4,3
4	1	21	32	0,7	
		31	43	0,7	
		37	53	0,7	
		49	67	0,7	
		65	80	0,8	
	2	2	61	20	3,1
			69	25	2,8
			74	30	2,5
			84	40	2,1
			92	44	2,1

## ANEXO X

# Escuela Politécnica Nacional

## Laboratorio de Ensayos no Destructivos

# Procedimiento de inspección de pernos por ultrasonido convencional

### 1. Objetivo

- Inspeccionar pernos de distintas dimensiones con ultrasonido convencional.

### 2. Alcance

El presente procedimiento de calibración por ultrasonido se enfoca en la inspección de pernos mediante la utilización del equipo UT Smartor y un transductor específico, siguiendo las normativas ASTM aplicables. Diseñado para pernos con dimensiones de diámetro determinadas, el procedimiento abarca la configuración detallada del equipo, la calibración con pernos patrón y la realización de ensayos. Limitado a las características del equipo y la normativa establecida, este procedimiento busca garantizar la precisión y fiabilidad de las inspecciones, contribuyendo así a la integridad estructural de los pernos evaluados. Cualquier desviación de este alcance podría comprometer la validez de los resultados obtenidos durante el proceso de inspección por ultrasonido convencional.

### 3. Términos

**Transductor:** Dispositivo que convierte electricidad en ondas sonoras para la inspección por ultrasonido.

**Acoplante:** Sustancia (como la glicerina) que mejora la transferencia de ondas ultrasónicas entre el transductor y el material inspeccionado.

**Amplitud de Eco:** Altura del pico en la pantalla del ultrasonido, indica la fuerza de la señal reflejada por irregularidades en el material.

**Discontinuidad:** Interrupción o cambio en la estructura del material (defectos, grietas), detectada por ultrasonido para evaluar la calidad del material.

## 4. Configuración del Equipo Smartor

### Paso 1: Consideraciones previas

Antes de **iniciar** la calibración, asegúrese de:

- Utilizar el transductor TGM5-10L.
- Seleccionar un acoplante adecuado; se recomienda **glicerina**.
- Realizar la **calibración** en secciones alejadas de los hilos de rosca para evitar interferencias de ruido.

### Paso 2: Encendido y selección de modo

1. Conectar el transductor al equipo.



Figura 1. Transductor en uso

2. Encienda el equipo y seleccione el modo de Medición de Espesores (TG) desde el menú inicial.



Figura 2. Menú inicial del equipo

### Paso 3: Configuración del transductor

1. Seleccione el tipo de transductor (TGM5-10L) y el sistema asociado desde la interfaz.



Figura 3. Especificación del Transductor en equipo

2. Colocar el tipo de material que compone el perno en el apartado Mtrl.

#### Paso 4: Configuración de la puerta

1. Acceda al menú de la puerta y configure la altura y longitud de la "puerta A." Ajuste los parámetros GASstart a una distancia de 2 mm antes del valor del bloque patrón que se utilizara como la primera referencia para definir el inicio y GAWidth para definir el ancho de la puerta a un valor de 5 mm.



Figura 4. Menú de Puerta

2. Escoger el valor de la altura de la puerta con la opción GAThresh a valores entre el 60 y 80%.
3. En la opción "Range", se ajusta el valor que modifica el rango del espesor que se va a analizar, tomando como referencia el doble del valor del patrón más grande que se utilizará para realizar la calibración. El valor de DsDply se puede dejar en 0 mm.

## Paso 5: Calibración de velocidad más retardo

1. Ingrese al menú de calibración y elija la opción Vel+ Dly.



Figura 5 Menú de Calibración

2. Utilice dos pernos de referencia con longitudes conocidas Ref1:141 mm y Ref2: 15.5 mm para la calibración
3. Colocar valor de Ganancia (Gain) inicialmente en 57.5 dB.
4. Colocar acoplante, preferible glicerina, en la cabeza del perno de la siguiente manera.



Figura 6. Acoplante en cabeza del perno

5. Posicionar la puerta sobre el pico más alto para dicha referencia y grabar con Record.



Figura 7. Grabación de referencia 1

6. Realizar el mismo procedimiento con la referencia 2.
7. Confirme la calibración del equipo al posicionar el transductor en la misma ubicación que las referencias, se debe de obtener los mismos valores para cada referencia que los calibrados.

## Ensayos de Ultrasonido

### Paso 6: Preparación para pruebas

1. Colocar acoplante en el perno que tiene discontinuidades inducidas.
2. Colocar el transductor directamente por encima de las discontinuidades.
3. Verificar la visualización de la discontinuidad.



Figura 8. Visualización de discontinuidad

Con estos pasos detallados, se logra una calibración precisa y se realiza la inspección de pernos con el equipo Smartor, asegurando resultados fiables en la detección de discontinuidades.

## 5. Normas de referencia

- ASTM. (2023). E1316-23 . "Standar Terminology for Nondestructive Examinations".
- ASTM. (2019). A388/A388M "Standard Practice for Ultrasonic Examination of Steel Forgings".
- ASTM. (2020). A745/A745M – 20 "Standard Practice for Ultrasonic Examination of Austenitic Steel Forgings".
- ASTM. (2020). E114 – 20. "Standard Practice for Ultrasonic Pulse-Echo Straight-Beam Contact Testing1".
- ASTM. (2020). E1685 – 20 . "Standard Practice for Measuring the Change in Length of Bolts Using the Ultrasonic Pulse-Echo Technique".
- ASTM. (2021). A363/A363M. "Standard Specification for Carbon and Alloy Steel Nuts (Inch and Metric)".
- ASTM. (2021). E1324 – 21 "Standard Guide for Measuring Some Electronic Characteristics of Ultrasonic Testing Instruments".
- ASTM. (s.f.). *Handbook of Reference Data for Nondestructive Testing*. (L. Mordfin, Ed.)

## 6. Documentos relacionados

N/A

## 7. Cuadro de Cambios

Versión	Descripción del Cambio	Fecha del Cambio
1.0	Creación del documento	Febrero 2024

