

Desarrollo de una metodología para evaluar la sensibilidad, precisión y exactitud de la técnica de inspección de cordones de soldadura *Time of Flight Diffraction* a partir de discontinuidades ideales.

Maria Andrea Carrillo Gómez

Maria Paula Galán García

Trabajo de grado presentado para optar por el título de Ingeniero Metalúrgico

Director

Carlos Andrés Galán Pinilla

Magister en Ingeniería de Materiales

Codirectora

Ana María Pérez Ceballos

Doctora en Ingeniería

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales

Bucaramanga, Santander

2021

Agradecimientos

Por Maria Andrea:

A Dios, por permitirme vivir esta experiencia y culminarla de la mejor manera posible, llena de lecciones no sólo académicas, sino de vida que me hicieron crecer como persona y como mujer.

A mis padres Eduardo y María Elena, por su apoyo incondicional, por darme el privilegio de estudiar esta carrera universitaria en una de las mejores universidades de Colombia, por apoyarme y enseñarme que trabajar por un sueño va más allá de lograr algo material.

A mis abuelitas Mariela (QEPD) y Barbara que, además de darme amor incondicional, fueron parte importante de mi proceso de crecimiento; este logro se lo dedico a ustedes. Abuelita Mariela, donde quiera que esté, espero se sienta orgullosa de mí y de lo que he logrado.

A mi familia: Lala, Sonia Lucero, Gloria, Patricia, Jorge, Sonia Q, Pedro, Jaime, Eduardo A., a mi hermana Tibisay, Julián, Marielita. A mis primos: Andreita, Carlos, Marce, Cindy, Jonathan, Juanse, mis sobrinas María José e Isabelita, Gracias, porque cada uno de ustedes fue parte importante de este camino, siempre con una palabra de ánimo y apoyo incondicional. El amor que recibo a diario de parte de ustedes es una bendición divina.

A mis amigos: Yiya, Marcela, Javier, Jeison, Carlos C., Stev, Germán, Katherine, Jhon Alex, Brenda, Sebas Pereira, por permitirme ser parte de sus vidas y disfrutar risas, historias, trabajos en grupo, y otras mil experiencias más que además de hacerme feliz, me enseñaron lo que es el valor de amistad.

A mi compañera de tesis y amiga, Mapu, gracias por todo. Fuiste parte fundamental de todo este proceso y me siento feliz y agradecida por esta amistad tan bonita y real que tenemos.

A cada uno de los profesores que hicieron parte de mi proceso universitario, especialmente a mis directores de tesis, profesor Carlos Galán y profesora Ana María Pérez. Me llevo de ustedes no solo una lección académica, sino también una lección de vida que me permitirá crecer como persona y profesionalmente.

Finalmente quiero agradecerle a mi hermana y mejor amiga, Diana. El amor y el apoyo tan incondicional y puro que tenemos es algo que le agradezco no a ella, sino a la vida misma, por ponerla a mi lado y permitirme crecer e ir de la mano con ella en todos los caminos.

Agradecimientos

Por Maria Paula:

Principalmente a Dios y a la Virgencita por ser mi fortaleza en todo momento, por las lecciones aprendidas y los logros alcanzados.

A mis padres por su amor incondicional: Mamá, gracias por creer siempre en mí, por ser ejemplo de amor, de valentía y enseñarme a enfrentar las pruebas de la vida con dignidad. Papá, gracias por enseñarme a soñar, a perseverar, a sentirme orgullosa de lo que soy y nunca conformarme con menos, aprecio profundamente todo el esfuerzo que han hecho, pues gracias a eso hoy me siento orgullosa de quién soy, los amo.

A mi hermana Lorena por ser mi compañera de vida, por cuidarme, por creer en mí y ayudarme a superar cada uno de mis miedos. A mis abuelos: Mario, Hilda y Lucio por ser mis angelitos en el cielo, por cada una de las lecciones enseñadas y por ser hasta el día de hoy ejemplo de amor y bondad.

A mis amigos: Juandi, Héctor y Diego por acompañarme durante tantos años y hacer de esta experiencia algo maravilloso. A Paola, Viviana, Anggie, Angélica y Mafe, mis amigas de toda la vida, gracias por ser incondicionales y estar a mi lado en todo momento. Agradezco especialmente a Edwar y Stiven por enseñarme lo que es ser un verdadero amigo y por devolverme la alegría en mi peor momento, los llevo eternamente en el corazón. A Andrés por su confianza, por su esfuerzo y cariño todo este tiempo.

A Martín por su apoyo todos estos años y aceptar esa responsabilidad con tanto cariño. A mi nonita Elisa por su amor infinito, a mis tías Martha y Sandra, gracias por cuidarme como a una hija y creer en mí. A mis tíos Andrés, Carlos y Eduardo gracias por hacer de mí una

mejor persona. A mi familia por ser parte de mi camino y animarme a seguir adelante. A mi pollito por cuidarme el corazón, por acompañarme en las locuras y darme tantas alegrías.

Al profesor Mauricio por compartir conmigo sus conocimientos, su valor profesional y sobre todo por ser un gran amigo, de corazón mi Mau que Dios te bendiga siempre. De igual forma gracias a cada uno de los profesores que hicieron parte de mi proceso académico y personal.

A Maria por compartir este sueño conmigo, por ser una amiga incondicional, por ver siempre lo mejor en mí y enseñarme tantas cosas que estarán por siempre en mi corazón. Pese a que no fue fácil para ninguna de las dos, agradezco a Dios, haber compartido este camino al lado de una excelente amiga y persona.

A mi mama Gladys, quiero agradecerle de manera especial por soñar con este triunfo más que yo, por cuidarme como una mamá, por su amor y paciencia conmigo todos estos años.

Finalmente, gracias a mi amada tía Mary, por enseñarme a querer incondicionalmente, a enfrentar cada prueba de la mano de Dios, a valorar la experiencia que otorga la edad, a sonreír aún en el dolor, a compartir lo mucho o poco que tengo, gracias porque, aunque ya no estás para acompañarme en este momento, eres una parte de mí y sé que desde dónde estás, me cuidas y celebras conmigo.

Tabla de contenido

	Pág.
Introducción.....	12
1.Objetivos.....	14
1.1Objetivo general.....	14
1.2 Objetivos específicos.....	14
2.Resultados.....	15
2.1 Generalidades de los Ensayos no Destructivos por Ultrasonido.....	15
2.1.1. Funcionamiento del ensayo por ultrasonido.....	16
2.1.2. Ensayo No Destructivo por Ultrasonido en soldaduras.....	18
2.2. Ensayo no Destructivo por Ultrasonido <i>Time of Flight Diffraction (TOFD)</i>	19
2.2.1. Principio de funcionamiento del Ensayo <i>TOFD</i>	20
2.2.2 Variables involucradas en la inspección <i>TOFD</i>	22
2.2.3. Equipo y configuración del sistema de inspección.....	24
2.2.4. Formación de imágenes del sistema de inspección <i>TOFD</i>	27
2.2.5. Limitaciones de la técnica <i>TOFD</i>	32
2.3. Diseño de metodología experimental para la verificación de la precisión y sensibilidad de la técnica <i>TOFD</i>	33
2.3.1. Diseño experimental factorial multinivel.....	33
2.3.2. Diseño de metodología experimental.....	37
2.4. Diseño del bloque de calibración para la verificación de la técnica <i>TOFD</i>	44
3. Conclusiones.....	46
Referencias Bibliográficas.....	47

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Comparación entre las técnicas ultrasónicas <i>PAUT</i> , <i>UT</i> y <i>TOFD</i>	19
Tabla 2. Guía de variables para la configuración del sistema de inspección <i>TOFD</i>	26
Tabla 3. Variables de estudio y niveles listados en el diseño experimental factorial multinivel.....	34
Tabla 4. Ejecuciones y combinaciones de cada variable <i>TOFD</i>	36
Tabla 5. Parámetros de configuración para detección de barrenos.....	38

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Principio físico ensayo por ultrasonido.....	16
Figura 2.a Principio de formación de ondas en <i>TOFD</i>	21
Figura 2.b Propagación de la onda en <i>TOFD</i>	21
Figura 3.a Representación de las trayectorias de las ondas en <i>TOFD</i>	23
Figura 3.b Esquema de onda y señales detectadas en <i>TOFD</i>	23
Figura 4.a Vista Frontal y superior de la posición de los palpadores en <i>TOFD</i>	25
Figura 4.b Equipo <i>TOFD</i>	25
Figura 5. Variación de la distancia <i>PCS</i> y el ángulo de difracción en un bloque con discontinuidades inducidas.....	27
Figura 6.a Representación de la Zona Muerta en <i>TOFD</i>	28
Figura 6.b Principio de formación de las imágenes <i>TOFD</i>	28
Figura 6.c Generación de imágenes a escala de grises a partir de <i>A- scans</i>	28
Figura 7.a Discontinuidad de tipo escoria detectada en la traza.....	30
Figura 7.b Discontinuidad de tipo grieta superficial detectada en la traza.....	30
Figura 8.a. Zona de escaneo e Indicación.....	31
Figura 8.b. Perfil de la soldadura y generación de imagen.	31
Figura 9. Imagen <i>TOFD</i>	32
Figura 10. Ajuste de rango y <i>Display Delay</i>	38
Figura 11. Pantalla de ajuste de parámetros del bloque de inspección.....	39
Figura 12. Efecto de la ganancia en la amplitud de la señal observada.....	40

Figura 13. Resultado del escaneo de la pieza.....	41
Figura 14. Configuración de los cursores para la medición de la longitud de la altura de los barrenos.....	42
Figura 15. Configuración de los cursores para la medición de la altura de los barrenos.....	42
Figura 16. Metodología propuesta para la evaluación de la técnica <i>TOFD</i>	43
Figura 17. Diseño del bloque de calibración propuesto.....	45

Resumen

Título: Desarrollo de una metodología para evaluar la sensibilidad, precisión y exactitud de la técnica de inspección de cordones de soldadura *Time of Flight Diffraction* a partir de discontinuidades ideales.¹

Autores: María Andrea Carrillo Gómez; Maria Paula Galán García ²

Palabras clave: *Time of Flight Diffraction*, Soldadura, Discontinuidad, Calibración, Ultrasonido, Ensayos No Destructivos, Defectología en Soldadura.

Los Ensayos No Destructivos (END) se utilizan especialmente en la evaluación de materiales, piezas y estructuras mecánicas, con el propósito de obtener información y detectar discontinuidades de proceso de fabricación y mecanismos de daño originados por servicio o corrosión, sin alterar las propiedades físicas y químicas de los componentes. Dentro de estas, la técnica *Time of Flight Diffraction (TOFD)* es uno de los métodos de inspección utilizado para evaluar volumétricamente las soldaduras a tope principalmente, en tubos, placas y recipientes que, al ser comparada con otras técnicas de ultrasonido, ofrece mayor velocidad y precisión en la detección de discontinuidades. A pesar de los estudios e investigaciones que hay sobre la técnica, su aplicación está condicionada a variables como la profundidad, el tamaño, la ubicación y morfología de las discontinuidades detectadas por la señal, lo cual dificulta llevar a cabo una medición precisa de estas. Adicionalmente, el éxito en la aplicación de la técnica *TOFD* depende también del inspector y la configuración adecuada del sistema de inspección. Por esta razón, en el presente trabajo se diseñó una metodología para la aplicación de la técnica (*TOFD*) que permita la verificación de precisión y sensibilidad simultáneamente, mediante el diseño de un bloque con discontinuidades inducidas. Para este fin, se realizó un diseño de experimentos, de manera que su ejecución permita evaluar las variables de estudio y análisis estadístico sin exceder el número de barridos y datos requeridos.

¹ Trabajo de Grado.

² Facultad Ingenierías Físico Químicas Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales
Director Carlos Andrés Galán Pinilla Codirectora Ana María Pérez Ceballos.

Abstract

Title: Development of a methodology to evaluate the sensitivity, precision and accuracy of the weld seam inspection technique *Time-of-Flight Diffraction* from ideal discontinuities.³

Author: María Andrea Carrillo Gómez; Maria Paula Galán García⁴

Key Words: *TOFD*, Inspection, Time of Flight, Welding, Discontinuity, Calibration, Ultrasound, Non-Destructive Testing, Probability of Detection, Defectology in Welding.

Non-Destructive Testing (*NDT*) is used especially in the evaluation of materials, parts and mechanical structures, with the purpose of obtaining information and detecting discontinuities in the manufacturing process and damage mechanisms caused by service or corrosion, without altering the physical and chemical properties. The *Time of Flight Diffraction (TOFD)* technique is one of the testing methods used to volumetrically evaluate mainly butt welds, in tubes, plates and containers, which, when compared with other ultrasound techniques, offers greater speed and precision in the detection of discontinuities. Despite the studies and research that exist on the technique, its application is conditioned by variables such as the depth, size, location and morphology of the discontinuities detected by the signal, which makes it difficult to carry out an accurate measurement of these. Furthermore, the successful application of the *TOFD* technique also depends on the inspector and the proper configuration of the inspection system. In the present work a methodology was designed for the application of the technique (*TOFD*) that allows the verification of precision and sensitivity simultaneously, by means of the design of a block with induced discontinuities.

³ Bachelor Thesis.

⁴ Facultad Ingenierías Físico Químicas Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales
Director Carlos Andrés Galán Pinilla Codirectora Ana María Pérez Ceballos.

Introducción

Los Ensayos No Destructivos han ganado gran relevancia a través del tiempo debido a su alta efectividad al momento de obtener información precisa sobre el estado interno y externo de los materiales de estudio, sin afectar sus propiedades químicas, mecánicas o físicas (Calderón Cáceres & Scarpatti Gálvez, 2018) en industrias como la aeronáutica, generación de potencia térmica o nuclear, industria ferroviaria, petroquímica y en procesos de unión por soldadura para la fabricación de piezas y estructuras (Delacoux et al., 2012). Por lo tanto, se requieren cada vez más métodos confiables, adecuados y precisos que brinden efectividad en la evaluación de dichas piezas (Lopez et al.2011). Dentro de estos ensayos sobresale la técnica *Time of flight diffraction (TOFD)*, por ser un método enfocado en detección de discontinuidades internas. No obstante, pese a los estudios e investigaciones que se han realizado sobre la técnica (Kotouzas & Pitteris, 2018), el éxito en la aplicación de *TOFD* está condicionado parámetros y variables como la profundidad, el tamaño, la ubicación o la morfología de la discontinuidad (Murillo Sigero, 2010). Por lo cual, no es fácil evaluar con precisión el tipo de discontinuidad asociada a las señales difractadas. Adicionalmente, el resultado obtenido está sujeto a la adecuada configuración del sistema de inspección, relacionado con los ángulos de refracción, la separación de las sondas, *Probe Centering Spacing (PCS)*, frecuencia de los transductores a utilizar, calibraciones y a una amplia formación sobre la técnica para el desarrollo del ensayo por parte del inspector. (Mayworm, 2021). En contraste, existe un déficit de inspectores que posean los conocimientos y certificaciones necesarias para desarrollar el ensayo, y sumado al costo de los equipos conduce a que su uso no sea masivo o rutinario. Teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente, surge la pregunta de investigación: ¿Es posible verificar, por medio de la implementación de una metodología, la precisión, sensibilidad y exactitud de la técnica *TOFD*, en la detección de discontinuidades artificialmente inducidas en un bloque? Para resolver la pregunta, en el

presente trabajo se planteó una metodología que permite estimar la precisión de la técnica *TOFD* mediante el uso de bloques de referencia diseñados con discontinuidades ideales y dimensiones conocidas, inducidas por mecanizado, a partir de la información consultada. Este enfoque permite identificar las variables que tienen mayor relevancia al momento de la ejecución de la técnica y generar un aporte a los procesos de aprendizaje dentro del laboratorio de Ensayos No Destructivos de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales; puesto que en él, se cuenta con el equipo *Olympus Omniscan mx2* con módulo para inspección con *TOFD*, que puede ser utilizado como marco de referencia en capacitación e investigación aplicada en la inspección de soldaduras y defectos internos de materiales metálicos.

1. Objetivos

1.1. Objetivo general

Diseñar una metodología experimental que permita verificar la sensibilidad, precisión y exactitud de la técnica *Time Of Flight Diffraction TOFD*, al estimar el tamaño de discontinuidades inducidas por mecanizado en sistemas de inspección, de cordones de soldadura.

1.2. Objetivos específicos

- Definir las variables que influyen en el método de inspección *Time of flight diffraction TOFD*, con base en el estudio bibliográfico, el principio físico de funcionamiento y los tipos de verificación recomendados.
- Estructurar una metodología experimental que permita verificar la sensibilidad de la técnica y la precisión de los resultados obtenidos al medir el tamaño de las discontinuidades en cordones de soldadura, usando la técnica *TOFD* dispuesta para el laboratorio de END de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales.
- Diseñar un bloque con discontinuidades artificiales para evaluar la precisión y exactitud en la estimación del tamaño de éstas, medidas con la técnica *TOFD*.

2. Resultados

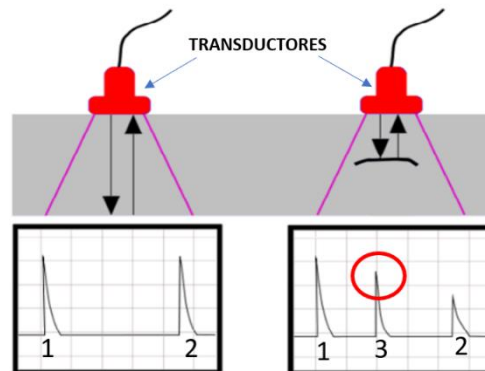
2.1. Generalidades de los Ensayos no Destructivos por Ultrasonido

Los Ensayos por Ultrasonido (*UT*) son un método para caracterizar y medir espesores, detectar zonas de corrosión, o analizar la estructura de una pieza fundida, forjada o soldada, que pueda presentar discontinuidades. Esto se hace mediante el uso de ondas sonoras de alta frecuencia, que suelen ser más altas que el límite de la audición humana, encontrándose generalmente en un rango de 500 KHz a 20 MHz (Barrera Suarez & Coronel Picón, 2011). En aplicaciones industriales, las pruebas ultrasónicas son ampliamente aplicadas a diferentes materiales como son: metales, materiales compuestos, plásticos y cerámicos (Karpel'son & Gusev, 1991). Sin embargo, no es posible realizar estas pruebas ultrasónicas en madera o piezas multicapa. La tecnología ultrasónica es adaptada del campo biomédico para el diagnóstico por imagen e investigación médica (The British Standard Institution, 2003).

La figura 1 representa el esquema del principio físico de funcionamiento para la técnica pulso-eco. En la imagen del lado izquierdo se observa un transductor que envía una onda de sonido hacia el material de prueba. Como resultado, Hay dos indicaciones (señales 1 y 2); la primera es el pulso inicial del transductor y la segunda, el eco de la pared posterior. En la imagen del lado derecho, se observa un defecto que origina una tercera indicación (enmarcado en el círculo rojo) y simultáneamente reduce la amplitud de la indicación proveniente de la pared posterior porque parte de la energía se refleja a partir de la discontinuidad (*Non Destructive Testing - Ultrasonic Testing*, 2021).

Figura 1.

Principio físico del ensayo por ultrasonido.



Nota: Adaptado de (*Non Destructive Testing - Ultrasonic Testing*, 2021). Izquierda: se observa una sonda que envía una onda de sonido hacia el material de prueba. Hay dos indicaciones, la primera es el pulso inicial de la sonda y la segunda, el eco de la pared posterior. Derecha: se observa un defecto que origina una tercera indicación y simultáneamente reduce la amplitud de la indicación proveniente de la pared posterior.

2.1.1. Funcionamiento del ensayo por ultrasonido

Las ondas sonoras de alta frecuencia son direccionales y viajan a través de un medio (ya sea una pieza de acero, plástico compuesto, etc.) hasta que se encuentran con otro medio (aire), reflejándose de regreso a su fuente. Al analizar esta energía reflejada, es posible medir el espesor de una pieza de prueba o encontrar evidencia de grietas u otras discontinuidades internas ocultas (Society et al., 2018). En las pruebas ultrasónicas se pasa un transductor conectado a un equipo, sobre el objeto que se está inspeccionando, este transductor generalmente está unido a la pieza inspeccionada por un medio acoplador (aceite, por ejemplo) o por agua, como en las pruebas de inmersión (*Ensayos Por Ultrasonidos SCI*, 2021).

Existen dos formas de recibir la onda de ultrasonido (reflexión y atenuación): en el modo de reflexión o pulso – eco, el transductor realiza tanto el envío como la recepción de las ondas pulsadas a medida que el “sonido” se refleja de regreso al dispositivo. El ultrasonido

reflejado proviene de una interfaz, como la pared posterior del objeto o de una imperfección dentro del mismo. El equipo muestra estos resultados en forma de una señal con una amplitud que representa la intensidad de la reflexión, directamente proporcional a la energía recibida, y la distancia recorrida, que ejemplifica el tiempo de llegada de la reflexión (ver Figura 1) (Marks, 2007).

En el modo de atenuación (o transmisión continua), un transmisor envía un pulso ultrasónico a través de una superficie y un receptor separado detecta el valor alcanzado en otra superficie después de viajar a través del medio; las imperfecciones u otras condiciones en el espacio entre el transmisor y el receptor reducen la cantidad de sonido transmitido, revelando así su presencia. El uso del acoplador aumenta la eficiencia del proceso al reducir las pérdidas en la energía de la onda ultrasónica debido a la separación de las superficies. (*Non Destructive Testing - Ultrasonic Testing*, 2021).

Ventajas

- Las pruebas ultrasónicas son completamente no destructivas.
- La pieza para inspeccionar no tiene que cortarse, seccionarse ni exponerse a productos químicos dañinos.
- Se requiere acceso a un solo lado, a diferencia de la medición con herramientas como calibradores.
- No existen riesgos potenciales para la salud asociados con las pruebas ultrasónicas, a diferencia de la radiografía.
- Si el equipo está configurado correctamente, los resultados son altamente confiables.

Limitaciones

- Se necesita un inspector capacitado para configurar las pruebas e interpretar correctamente los resultados.

- La inspección de algunas geometrías complejas pueden ser un obstáculo.
- Los medidores de espesor ultrasónicos deben calibrarse con respecto al material que se está midiendo.
- Para la medición de múltiples espesores o materiales acústicamente diversos, pueden requerirse múltiples configuraciones.
- Los medidores de espesor ultrasónicos son de alto costo.

2.1.2. Inspección de soldaduras por Ultrasonido

Las soldaduras son de gran utilidad en la industria para ensamblar piezas metálicas, como tuberías y placas. Su funcionamiento y larga vida útil son cruciales al momento de proporcionar eficiencia en los componentes, pero debido a su proceso de fabricación o las operaciones de servicio, los defectos como grietas, porosidades y falta de fusión pueden ocasionar fallas graves, si no se detectan a tiempo (Mohseni et al., 2021). Una de las características más útiles de las pruebas ultrasónicas es su capacidad para determinar la posición exacta de una discontinuidad en una soldadura. Este método de ensayo requiere un alto nivel de capacitación del inspector; también se utiliza para evaluar secciones más gruesas hacia las cuales se puede acceder por un solo lado. Por lo general, la capacidad de la técnica de detectar grietas más finas o defectos más simples, hacen que la implementación del ensayo por ultrasonido sea preferible sobre las pruebas radiográficas y magnéticas. La inspección de soldaduras se realiza con haz angular de manera que el palpador no se ubica sobre la corona de soldadura, sino en el material base, utiliza generalmente modos de onda transversales de mayor sensibilidad (*Non Destructive Testing - Ultrasonic Testing*, 2021).

2.2. Ensayo no Destructivo por Ultrasonido *Time of Flight Diffraction (TOFD)*

La técnica *TOFD* es uno de los métodos por ultrasonido que se utiliza en la inspección volumétrica de soldaduras. Esta técnica tiene un dimensionamiento preciso que permite su aplicación para pruebas ultrasónicas automatizadas en cordones de soldaduras, desarrollada especialmente para las pruebas en plantas de energía nuclear (Petcher & Dixon, 2015). Comparada con otras técnicas como *Phased Array (PAUT)* y *Ultrasonido (UT)*, *TOFD* ofrece mayor precisión en la detección de discontinuidades ubicadas en la pared media de la pieza (internas); a su vez ofrece mayor velocidad en la calibración, escaneo y análisis de los datos. La tabla 1 muestra una comparación entre las técnicas *PAUT*, *UT* y *TOFD*, en la cual se puede apreciar que la técnica *TOFD* necesita menos tiempo de preparación del sistema de inspección que *PAUT*; además, *TOFD* tiene capacidad de detección de discontinuidades con menor cantidad de barridos, mientras que *PAUT* y *UT* comúnmente requiere más de uno; la técnica *TOFD* ofrece ventajas al momento de detectar la profundidad de las discontinuidades, pero a su vez presenta zonas muertas o puntos ciegos de inspección, ubicados en las superficies frontal y posterior de la pieza (Kotouzas & Pitteris, 2018).

Tabla 1.

Comparación entre las técnicas ultrasónicas PAUT, UT y TOFD.

Técnica	Número Total de escaneos	Número De sondas angulares	Tiempo preparación del sistema	Tiempo de toma de datos	Tiempo de análisis de datos	Detección de la profundidad de la discontinuidad	Zonas muertas
UT	8	2	Bajo	Alto	Alto	No	Sí*
PAUT	4	1	Alto	Bajo	Medio	Sí	Sí*
TOFD	1	2	Medio	Bajo	Alto	Sí	Sí
Sí*: Zona muerta muy pequeña ubicada en la pared frontal en el área de contacto con el transductor.							

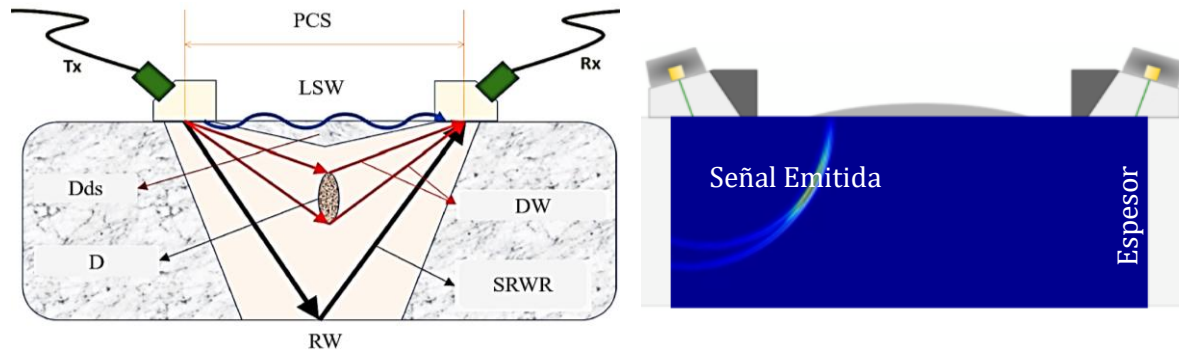
Nota: Adaptada de (Kotouzas & Pitteris, 2018).

2.2.1. Principio de funcionamiento del ensayo *TOFD*

El uso de la técnica *TOFD* se remonta al año 1977 en la industria nuclear del Reino Unido y hoy en día es reconocida por proporcionar el dimensionamiento preciso de discontinuidades como falta de fusión, poros, escorias, defectos tridimensionales y grietas, encontrados de manera interna en cordones de soldadura (Yeh et al., 2018). El principio físico de la técnica se basa en el uso de ondas longitudinales difractadas dentro del material, donde los sensores de ultrasonidos son ubicados a cada lado de la soldadura. El sensor transmisor (TX) se encarga de enviar el haz ultrasónico al material, y el sensor receptor (RX) recibe el ultrasonido reflejado y difractado, proveniente de anomalías o reflectores geométricos, como se representa en la Fig.2 a y b. De esta manera *TOFD* posee una amplia área de cobertura mediante el uso de un solo haz, aplicando la teoría de la divergencia del haz proveniente del ultrasonido, que parte desde la superficie del transductor hasta el interior del material bajo inspección debido al empleo de transductores de muy bajo diámetro y alta frecuencia (*Sondas y Suelas (Zapatas) TOFD*, 2021). Cuando el haz incide sobre una discontinuidad, la energía difractada se proyecta en todas las direcciones, ya que la discontinuidad se convierte en la nueva fuente de la cual se desprende la señal y se propaga. Al medir el tiempo de vuelo de los haces difractados, es posible detectar y dimensionar eficientemente los defectos, incluso si la discontinuidad, se encuentra orientada hacia la misma dirección inicial del haz.

Figura 2.

a) Principio de formación de ondas en TOFD. b) Propagación de la onda en TOFD.



Nota: a). PCS: Separación central entre los transductores, LSW: Onda lateral superficial, Dds: Zona muerta, D: Discontinuidad, DW: Ondas difractadas, SRWR: Reflexión especular de la pared trasera, RW: Pared posterior, Tx: Emisor, Rx: Receptor Adaptada de (Mayworm et al., 2021). b). Adaptada de (*Introduction to TOFD 1.0*, 2021).

Para realizar la inspección de la soldadura, los palpadores comienzan a ser desplazados paralelos a la zona de inspección o que se considera más propensa a tener alguna defectología, en este caso, los cordones de soldadura. El receptor normalmente detecta dos ondas, una que viaja a lo largo de la superficie frontal del material a inspeccionar, *LSW* (Onda Rayleigh⁵), y otra que se refleja en la pared posterior, *RW* (onda de compresión u onda longitudinal) (Fig.2a) (Burger & Fuchs, 2005). Cuando el haz ultrasónico ha detectado una discontinuidad interna este genera un patrón de difracción a medida que se propaga la onda longitudinal, permitiendo establecer la presencia de discontinuidades en la pieza. Al medir el tiempo de vuelo del pulso, es posible calcular la profundidad que presenta la discontinuidad. El tamaño y la posición de

⁵ Las ondas de Rayleigh son un tipo de onda acústica superficial que viaja a lo largo de la superficie de los sólidos.

la discontinuidad observada son determinados a partir del tiempo de vuelo de las ondas difractadas. No obstante, es importante tener en cuenta que la amplitud de dicha señal no se utiliza para estimar el tamaño de la discontinuidad y que el rango de espesor que la técnica *TOFD* es capaz de detectar, se encuentra entre los 6 y 300 mm (ASTM International, 2004).

2.2.2. Variables involucradas en la inspección por *TOFD*

El tamaño y la profundidad de la discontinuidad detectada se calculan a partir de la superficie de inspección y se necesitan una serie de ecuaciones que se listan a continuación: Suponiendo que se parte de una grieta orientada en un plano perpendicular a la superficie de inspección como se observa en la figura 3. a), y que esta se encuentra a mitad de camino entre Tx y Rx, con el extremo más cercano a la superficie de inspección y a una distancia d por debajo de ella; la separación entre los transductores (*PCS*) se toma como $2S$ y la velocidad de propagación de las ondas se toma como C , entonces los tiempos de llegada de cada señal emitida y detectada se muestran a continuación (Charlesworth, 2002).

$$t_L = \frac{2S}{c} \quad (1)$$

$$t_1 = \frac{2\sqrt{s^2+d^2}}{c} \quad (2)$$

$$t_2 = \frac{2\sqrt{s^2+(d+a)^2}}{c} \quad (3)$$

$$t_{bw} = \frac{2\sqrt{s^2+T^2}}{c} \quad (4)$$

En la figura 3 se representan los tiempos t_L , t_1 y t_2 , y H el espesor de la placa. t_1 y t_2 representan los tiempos de llegada de las señales difractadas por los extremos de la discontinuidad. La señal t_L es la primera señal detectada dada por la onda lateral, mientras que la señal t_{bw} es el tiempo de llegada de la señal detectada por el eco de fondo (señal de la pared posterior), C es la velocidad de la propagación de las ondas en el medio (Burger & Fuchs,

2005). Reordenando las ecuaciones anteriores, se tiene la profundidad de la parte superior (d) de la grieta y la longitud (a) (ecuaciones 5 y 6 respectivamente) desde la superficie de inspección como se señalan en la figura 3. a) (Charlesworth, 2002). La ubicación de la discontinuidad se determina a partir de la diferencia de tiempo entre la onda lateral (LSW) y los pulsos que se ven en las trayectorias $P_1 + P_2 (t_1)$ o $P_3 + P_4 (t_2)$ (Figura 3).

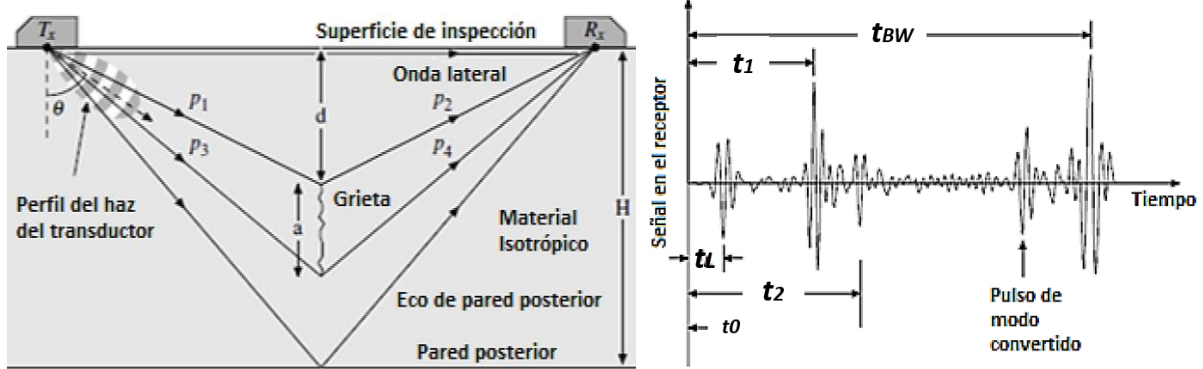
$$d = \frac{1}{2} \sqrt{C^2 t_1^2 - 4s^2} \quad (5)$$

$$a = \frac{1}{2} \sqrt{C^2 t_2^2 - 4s^2 - d} \quad (6)$$

Figura 3.

a) Representación de las trayectorias de las ondas en TOFD.

b) Esquema de onda y señales detectadas en TOFD.



Nota: Representación de las ondas y los tiempos de vuelo de TOFD. Las ubicaciones de las puntas de la fisura se determinan a partir de las diferencias de tiempo entre la onda lateral y los pulsos que siguen las trayectorias $p_1 + p_2$ o $p_3 + p_4$. Estos caminos, dibujados en la figura 3. b) corresponden a t_1 y t_2 respectivamente. Adaptado de (Charlesworth, 2002).

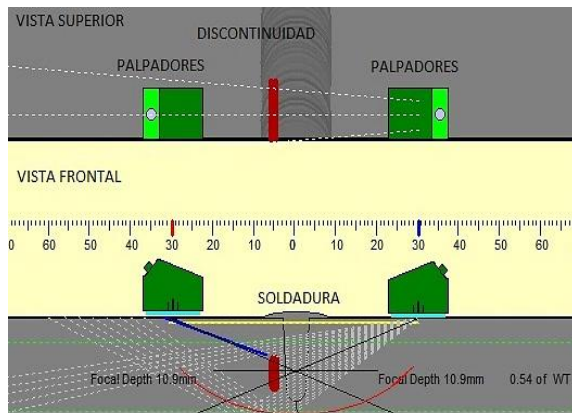
Con base en la anterior imagen se identificaron las variables de operación que intervienen en la inspección con la técnica *TOFD*, estas son: el espesor del bloque o placa en inspección, la distancia *PCS* entre los transductores, los tiempos de vuelo de cada una de las ondas, el tipo de material en inspección, el ángulo del haz difractado y la velocidad de propagación de las ondas en el medio.

2.2.3. Equipo y configuración del sistema de inspección *TOFD*

Con el fin de identificar las variables involucradas en la inspección con *TOFD*, se describe el equipo y su configuración. En este sentido, la técnica utiliza amplitudes de señal relativamente bajas con transductores de ondas longitudinales difractadas. A su vez, la técnica requiere el uso de transductores de frecuencias menores a 15 MHz, por lo cual el método se puede aplicar en materiales con niveles de atenuación bajos y divergencia de ondas ultrasónicas (The British Standard Institution, 2011). En general, la técnica se puede aplicar sobre soldaduras y componentes de aceros al carbono no aleados y de baja aleación, aceros austeníticos de grano fino y aluminio (Ruan C. Mayworm et al., 2015). Los transductores de *TOFD*, observados en la figura 4.a), son los encargados de generar las ondas longitudinales difractadas y deben estar alineados entre sí, controlando su separación y ubicación respecto a la soldadura o zona de interés a ser evaluada, como se señala en la figura 4. b). Para la emisión y recepción de la onda difractada en el área de estudio se debe tener en cuenta que: para soldaduras de geometría simple y con cordones estrechos en la superficie posterior, la prueba debe realizarse en uno o más escaneos, dependiendo del espesor de la pared. Si es el caso de las soldaduras a tope en X, o de soldaduras con diferencia de espesor a los lados del metal base, se debe usar la siguiente tabla como guía para la configuración de la prueba (*Detector de Defectos Por Ultrasonido Multielemento OmniScan X2*, 2020).

Figura 4.

a) Vista superior y frontal de la posición de los palpadores en TOFD.



b) Equipo TOFD



Nota: La figura a) representa el montaje de los palpadores sobre la pieza o bloque en inspección. Adaptada de (*Software UTman600*, 2021). La figura b) representa el equipo TOFD, sus palpadores y pantalla de análisis de resultados, como se encuentran comercialmente. Tomada de (*Detector de Defectos Por Ultrasonido Multielemento OmniScan X2*, 2020).

La tabla 2 presenta las configuraciones recomendadas para la inspección de soldaduras en función del espesor según el estándar internacional ISO-10863 de 2011. En la norma se especifica que para espesores comprendidos entre 6 y 50 mm se puede obtener un rango de profundidad completo (de todo el espesor) utilizando una sola configuración (escaneo). Sin embargo, se debe adaptar la frecuencia central y el ángulo del haz en función del espesor del elemento; se debe tener en cuenta también que, debido a las zonas muertas presentadas, como se observa en la figura 6.a) hay una tercera parte del espesor que queda sin inspeccionar. Se puede observar también que, para el rango de espesor de 15 a 35 mm, debe usarse un ángulo de haz que se encuentre en el rango de 60 a 70 ° y un tamaño de elemento de 2 a 6mm. Para mayores espesores, se debe utilizar un mayor número de configuraciones o pares de

transductores, variando el ángulo del haz y el punto de intersección de los haces de acuerdo con el rango de profundidad que se debe cubrir y al tamaño del elemento, teniendo en cuenta las recomendadas de la tabla 2 (The British Standard Institution, 2011).

Tabla 2.

Guía de variables para la configuración del sistema de inspección TOFD.

Espesor t mm	Numero de configuraciones de	Rango de profundidad Δt Mm	Frecuencia central f MHz	Ángulo del haz (Longitud de ondas) α°	Tamaño del elemento mm	Ángulo de intersección
6 a 10	1	0 a t	15	70	2 a 3	2/3 de t
>10 a 15	1	0 a t	15 a 10	70	2 a 3	2/3 de t
>15 a 35	1	0 a t	10 a 5	70 a 60	2 a 6	2/3 de t
>35 a 50	1	0 a t	5 a 3	70 a 60	3 a 6	2/3 de t
>50 a 100	2	0 a t/2	5 a 3	70 a 60	3 a 6	1/3 de t
		t/2 a t	5 a 3	60 a 45	6 a 12	5/6 de t
		0 a t/3	5 a 3	70 a 60	3 a 6	2/9 de t
>100 a 200	3	t/3 a 2t/3	5 a 3	60 a 45	6 a 12	5/9 de t
		2/3t a t	5 a 2	60 a 45	6 a 20	8/9 de t

Nota: Adaptada de (The British Standard Institution, 2011).

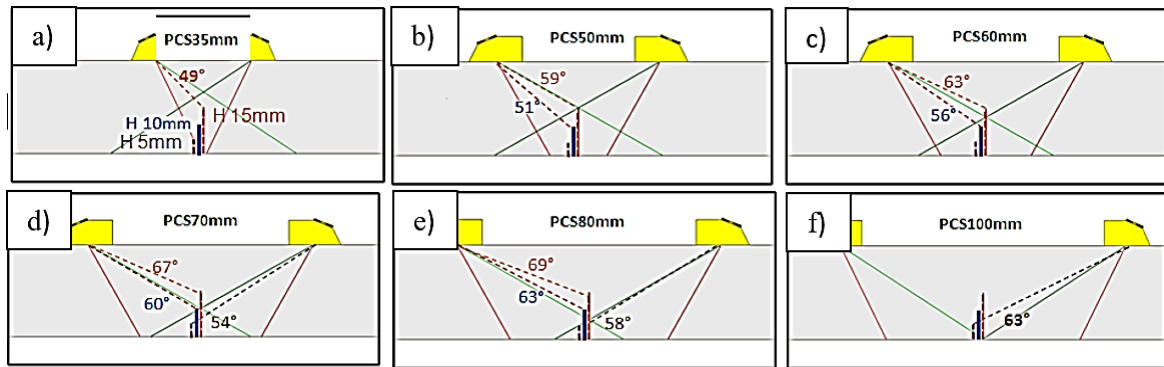
En la figura 5 a) a la 5 f) se observa la variación del ángulo de refracción (45°, 60°, 70°) y de la distancia PCS (35, 50, 60, 70, 80, 100 mm) en un bloque de espesor de 30 mm con discontinuidades (entallas) inducidas desde la pared posterior con alturas de alturas 5 mm, 10 mm, y 15 mm respectivamente. Como se representa en la figura 5, a medida que la distancia PCS crece, los ángulos de difracción de los rayos incidentes, con los cuales se detectaría el extremo superior de las entallas, aumentan. Esto demuestra que el ángulo y la distancia PCS, son variables determinantes al momento de detectar discontinuidades a diferentes profundidades de una pieza o soldadura ya que, a medida que la PCS aumenta, la cobertura es menor. Sin embargo, se debe tener en cuenta que la distancia PCS se calcula mediante la ecuación (7) mostrada a continuación (CIVA - *Experimental Characterization - TOFD - Top Edge of Vertical Notch*, 2021). Por lo que, para cualquier configuración del ensayo TOFD que

se realice, es necesario guiarse por la tabla 2 presentada anteriormente. La separación *PCS* de los transductores (2*S*) se calcula a partir de la ecuación (7), en donde *T* es el espesor del bloque, y θ es el ángulo de refracción seleccionado (Boiler, 2019).

$$2S = \frac{4T}{3} \tan \theta \quad (7)$$

Figura 5.

Variación de la distancia PCS y el ángulo de difracción en un bloque con discontinuidades inducidas.



Nota: La figura representa el efecto que da la variación de la distancia *PCS* en los transductores, y el ángulo de difracción de la onda, al detectar discontinuidades a diferentes profundidades. Adaptado de (CIVA - *Experimental Characterization - TOFD - Top Edge of Vertical Notch*, 2021).

2.2.4. Formación de imágenes del sistema de inspección TOFD

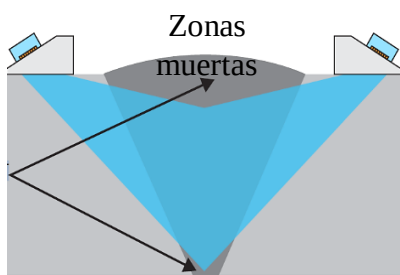
El funcionamiento de la técnica se basa en dos sondas o transductores que actúan como emisor y receptor de ondas longitudinales difractadas. En caso de que se detecte una discontinuidad, se reciben dos señales correspondientes a las ondas de difracción generadas desde los extremos superior e inferior de la discontinuidad. La diferencia del tiempo entre las

señales de difracción superior e inferior, permiten determinar de manera precisa la altura de las discontinuidades detectadas perpendiculares a la superficie (Gallardo et al., 2017).

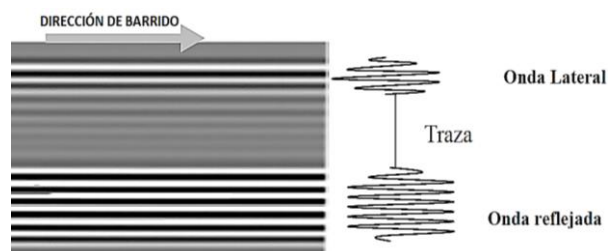
La figura 6. b) muestra el principio básico de formación de imágenes, donde debido a la difracción se envían dos señales: una generada por la parte superior de la soldadura (onda lateral) y otra generada por la parte inferior (onda reflejada). La zona gris intermedia, señalada en la figura 6. b) como traza y ubicada en la mitad, corresponde a la zona efectiva de inspección dentro del cordón de soldadura (espesor) y hace referencia a una zona de inspección o de barrido sin defectos. En la figura 6.c) se observa una imagen a escala de grises (derecha) de una señal A- Scan en la cual, debido a las señales de las ondas laterales y las ondas reflejadas, se generan pulsos que dan lugar a bandas o “cebras” blanco- negro que son visibles como líneas continuas durante el proceso de barrido. Las señales permiten identificar la fuente de la onda, mostrando la parte superior o inferior de la discontinuidad (Boiler, 2019). Las zonas muertas son excluidas dentro de la zona inspección como se representa en la Figura 6. a), restringiendo la posibilidad de poder examinar discontinuidades en la parte superior e inferior del cordón (Martín et al., 2007). Las zonas muertas se pueden reducir o mejorar en la imagen obtenida, con el uso de transductores de banda ancha o mediante el uso de alta frecuencia.

Figura 6.

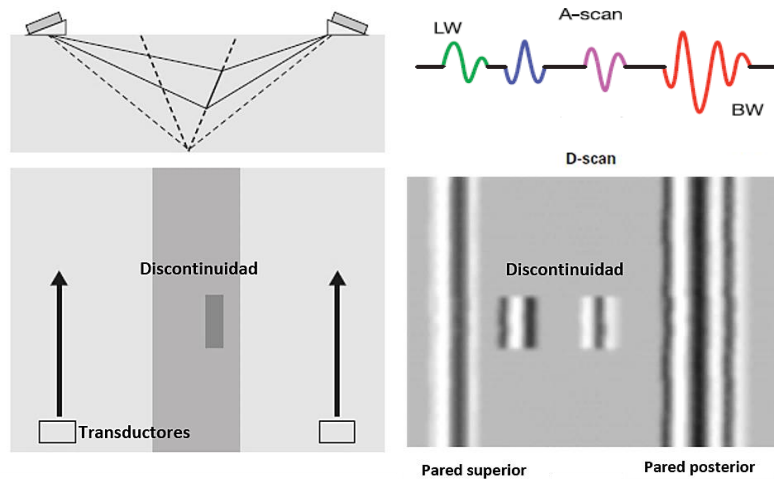
a) Representación de la Zona Muerta



b) Principio de formación de las imágenes TOFD.



c) Generación de imágenes a escala de grises a partir de A- scans.

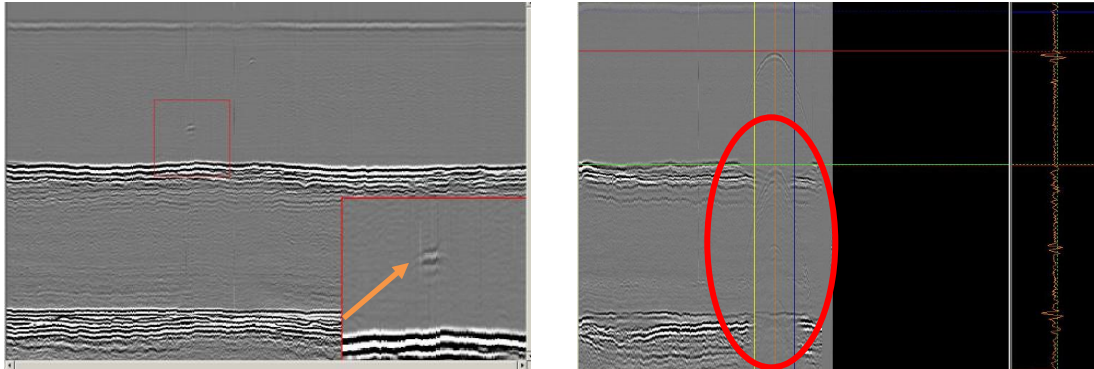


Nota: a) Adaptada de (*Introduction to TOFD 1.0*, 2021). b) Adaptada de (Martín et al., 2007).
c) Adaptada de (Boiler, 2019).

A continuación, se presentan imágenes que permiten ver la forma como se presentan los resultados de inspección *TOFD*, observando algunas discontinuidades detectadas con la técnica y evidenciando que se requiere alta formación debido a que en ocasiones la presentación de la indicación es de forma muy sutil y dificulta la relación con la morfología de la discontinuidad. En la figura 7. a) se muestra una discontinuidad de tipo escoria, señalada con la flecha naranja en el recuadro de la pantalla de análisis. Se observa que en la formación de la traza hay una interrupción de la señal detectada debido a la discontinuidad encontrada (Martín et al., 2007).

Figura 7.

a) Discontinuidad de tipo escoria detectada en la traza. b) Discontinuidad de tipo grieta superficial detectada en la traza.



Nota: Adaptada de (Martín et al., 2007).

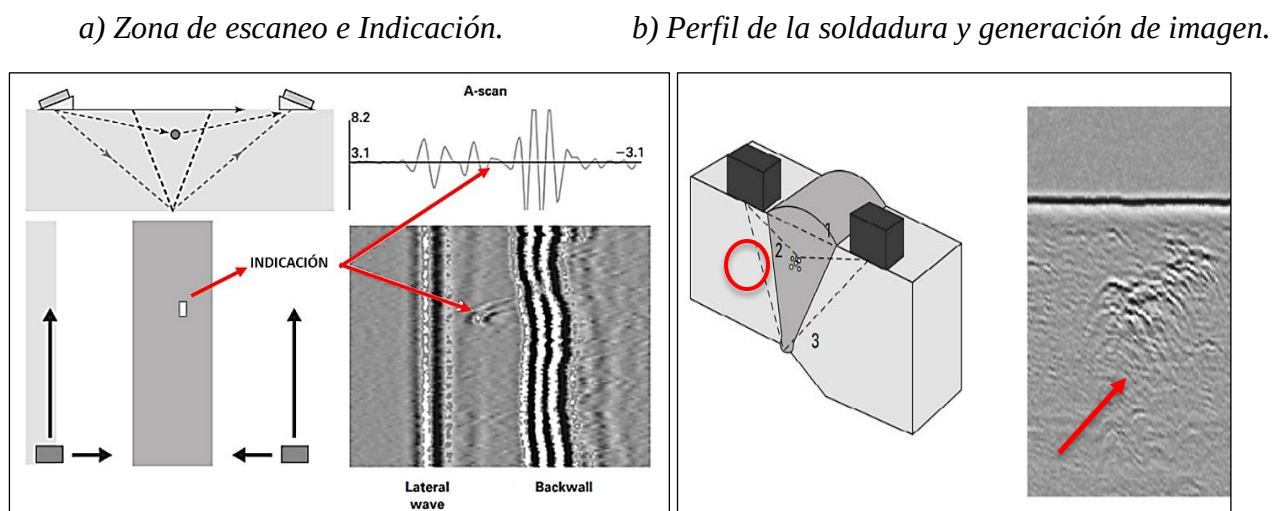
En la figura 7. b) se observa una discontinuidad en forma de grieta localizada en la pared posterior de la soldadura, inspeccionada por *TOFD*, la cual se muestra señalada en el círculo rojo. Se puede ver como al detectar una discontinuidad hay una pérdida o interrupción de la señal eco de fondo o *BWE* (*Back Wall Echo*) (Martín et al., 2007). De esta manera, las figuras 7. a). y b). mostradas se forman a partir de las señales *A-scan*, convirtiéndolas en una imagen *B-scan*. (Segura & Rodríguez, 2012). La pantalla de *A-scan* es un gráfico de amplitud en función del tiempo de vuelo de la onda, con la posibilidad de representar la distancia recorrida. Por su parte, en la vista *B-scan* se proyecta una imagen a partir de información recolectada de una inspección ultrasónica trazada, cuya sección transversal es perpendicular al objeto de inspeccionado. De esta manera, las señales *A-scan* contienen la información para generar una imagen de *B-scan*, siendo una representación típica de *TOFD* (Sanchez Moreno, 2014).

Las figuras 8. a) y b) representan el sistema de generación de imágenes y formas de onda en las pantallas *TOFD* que muestran las discontinuidades detectadas. Para ello es

importante aclarar que los defectos puntuales suelen mostrar una sola señal *TOFD* ya que la altura de estos es más pequeña que el punto más bajo generado por el pulso (generalmente unos pocos milímetros, dependiendo de la frecuencia del transductor y la amortiguación). Este tipo de defectos puntuales, tienden a mostrar "colas" parabólicas donde la señal cae hacia la pared trasera, señaladas con las flechas en las figuras 8. a) y b) (Martínez et al., 2012).

Figura 8.

Esquemas de generación de imágenes y forma de onda TOFD.



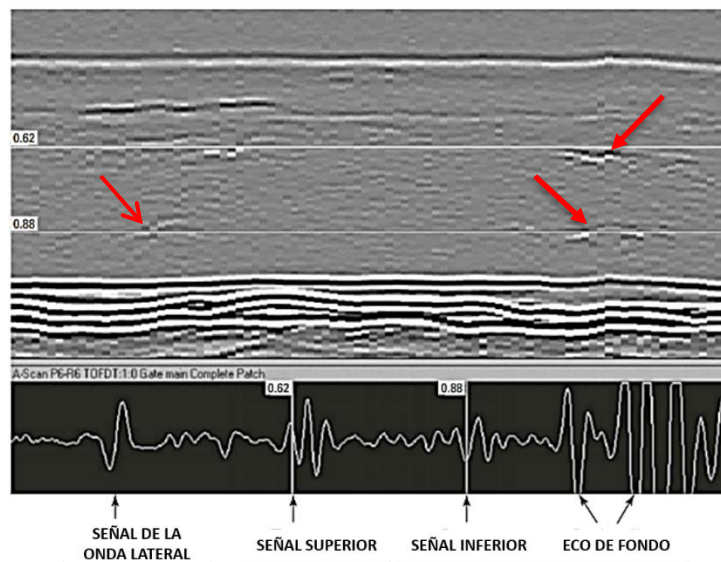
Nota: Adaptada de (Boiler, 2019).

La porosidad en la figura 8. b) genera una serie de curvas hiperbólicas con amplitudes variables, señaladas con la flecha roja. Las curvas hiperbólicas de *TOFD* están superpuestas ya que cada porosidad, está estrechamente espaciada. Esto no permite llevar a cabo un análisis verídico, pero la naturaleza única de la imagen permite la caracterización de las señales como "múltiples defectos puntuales pequeños", es decir, porosidad agrupada (Boiler, 2019). Las grietas transversales señaladas con las flechas rojas en la figura 9, se asemejan a un defecto puntual, por lo que el escaneo *TOFD* muestra una hipérbola típica. Normalmente, no es posible

diferenciar las grietas transversales de la porosidad cercana a la superficie usando *TOFD*; se necesita una inspección adicional ya sea con *PAUT* o Rayos X para verificar la información, siendo una limitación propia del ensayo (Segura & Rodríguez, 2012).

Figura 9.

Imagen TOFD.



Nota: La imagen muestra señales difractadas (flechas rojas) superior e inferior desde la línea central de la grieta y *A-Scan* representan los extremos de la discontinuidad detectada. Adaptado de (Boiler, 2019).

2.2.5. Limitaciones de la técnica *TOFD*

La presencia de la zona muerta imposibilita la detección de discontinuidades cercanas a la pared superior, que puedan formarse bajo la superficie de inspección (Figura 6. a). La zona muerta puede estar entre el rango de 4 mm a 8 mm, medida desde la superficie de inspección. En este sentido se sugiere el uso de bloques de calibración que contengan

orificios laterales, perforados que permitan validar la zona y la precisión del dimensionamiento (Birring & Nde, 2020).

En ocasiones se requiere el uso de más de un par de palpadores simultáneamente en cada barrido para cubrir la sección transversal de interés. Esto genera un aumento en el costo debido al mayor número de barridos o accesorios usados (The British Standard Institution, 2018).

La técnica no permite ser usada en aceros inoxidables, fundiciones y componentes con espesores menores de 12mm, ya que se reduce la sensibilidad de la técnica (ASTM International, 2004).

Se requiere alta experiencia en el manejo del equipo por parte del inspector, como también en la capacidad de análisis de las imágenes *A-scan* y *B-scan* de los resultados (Burger & Fuchs, 2005).

2.3. Diseño de metodología experimental para la verificación de la precisión y sensibilidad de la técnica TOFD

Con el fin de diseñar una metodología para evaluar la precisión, sensibilidad y exactitud de la técnica en estudio, utilizar el menor número de barridos y discontinuidades tipo entallas a mecanizar en el bloque de calibración y, además, facilitar el análisis de resultados, se propone un diseño de experimentos factorial multinivel ya que permitirá realizar las diferentes combinaciones de las variables de estudio que se determinaron y se explican a continuación.

2.3.1. Diseño experimental factorial multinivel

Para el desarrollo de la metodología experimental se hizo énfasis en la verificación de la precisión y sensibilidad en los resultados obtenidos por la técnica *TOFD*. Inicialmente se identificaron las variables que determinan la configuración de la técnica y que a su vez juegan

un papel importante en la variación de los datos obtenidos al detectar discontinuidades en el cordón de soldadura. Con base en la información presentada en capítulos anteriores, en los requisitos indicados en la tabla 3 de la norma ISO 10863 de 2011 (The British Standard Institution, 2014) y las especificaciones del código ASME Sección V artículo 4, Mandatorio apéndice III (Boiler, 2019), se realizó un diseño experimental factorial multinivel, desarrollado por el software *STATGRAPHICS 19- X64*, en el cual se listaron las variables de estudio y los valores asignados, con el fin de realizar un análisis de varianza y efectos principales de Pareto que permita valorar el efecto de cada variable de estudio sobre las dimensiones de las discontinuidades inspeccionadas con *TOFD*. Los factores analizados se presentan en la tabla 3. A partir de este análisis se diseñaron las discontinuidades más relevantes en un bloque de referencia, cuyos resultados se presentarán en el siguiente capítulo. Finalmente se decidió realizar un experimento factorial multinivel debido a que las variables de estudio no cuentan con el mismo número de niveles.

Tabla 3.

Variables de estudio y niveles listados en el diseño experimental factorial multinivel.

Factores (Variables de estudio)	Niveles	Variables de respuesta.
Frecuencia	5MHz	Tamaño de la discontinuidad (Altura de la entalla en mm)
	10MHz	
Ángulo	45°	
	60°	
	70°	
PCS (mm)	33.86 (Para 45°)	
	58.65 (Para 60°)	
	93.04 (Para 70°)	
Discontinuidad	Discontinuidad (1)	
	Discontinuidad (2)	

Nota: La tabla 4 listas las variables de estudio relevantes al configurar y calibrar el sistema de inspección *TOFD*, y con las cuales se realizó el diseño experimental multinivel. Adaptada de (Centurion XIX - Programa Para Su Evaluación - Statgraphics, 2021).

El diseño experimental tipo factorial-multinivel permite minimizar en lo posible el número de barridos para lograr ver cómo influyen las variables de estudio, al momento de detectar las discontinuidades propuestas: discontinuidad (1) de altura 6.35mm y discontinuidad (2) de altura 19.05mm. Entre los factores que se seleccionaron, tomando como referencia la tabla 5 y pensando en la economía del montaje, el más relevante fue el espesor del bloque de referencia ya que este es un valor fijo según lo establecido por el código ASME Sección V artículo 4, Mandatorio apéndice III (2019), que para este análisis fue 25.4mm (1 pulgada). Seguidamente, la frecuencia escogida para los transductores fue de 5 y 10 MHz, ya que son los que se disponen en el laboratorio de Ensayos No Destructivos de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales de la UIS. La variación de la frecuencia de los transductores modifica la sensibilidad y la zona de cobertura del ensayo, ya que al tener mayor frecuencia, la longitud de onda es menor, lo cual producirá una mayor sensibilidad en los resultados; al disminuir la frecuencia aumenta la penetración y la dispersión del haz, pero disminuye la sensibilidad, de manera que al tener dos frecuencias diferentes permitirá estudiar el efecto de estas variaciones (Marks, 2007). En cuanto a los ángulos de difracción, se seleccionaron de 45, 60 y 70° ya que son los ángulos nominales determinados para la aplicación de la técnica (Olympus, 2015) y a su vez se encuentran disponibles en el laboratorio. La distancia entre los transductores (*PCS*) se determinó a partir de la ecuación (7), la cual depende del espesor del bloque y de los ángulos de difracción: las distancias *PCS* obtenidas fueron 33.86mm (45°), 58.65mm (60°) y 93.04mm (70°). Todas las variables de estudio y los niveles mencionados se seleccionaron con el fin de abarcar de manera general la técnica y obteniendo 12 ejecuciones diferentes de variables, las cuales se indican en la tabla 5 y que preceden al diseño de la metodología y a la calibración del equipo (*Centurion XIX - Programa Para Su Evaluación - Statgraphics*, 2021). El objetivo de la tabla 4 es tener las combinaciones de factores para todas las variables, con el fin de determinar la precisión y sensibilidad de la

técnica al medir las discontinuidades entalladas en el bloque de referencia, a diferentes profundidades.

Tabla 4.

Ejecuciones y combinaciones de cada variable TOFD.

Ejecución	Frecuencia (MHz)	Ángulo (°)	PCS (mm)	Discontinuidad (tipo 1 y 2)	Altura (mm)
1	10	60	58,65	2	Tamaño de la discontinuidad (mm)
2	10	45	33,86	2	
3	10	45	33,86	1	
4	10	60	58,65	1	
5	5	70	93,04	1	
6	5	45	33,86	1	
7	10	70	93,04	1	
8	5	45	33,86	2	
9	5	70	93,04	2	
10	5	60	58,65	2	
11	10	70	93,04	2	
12	5	60	58,65	1	

Nota: La tabla representa las combinaciones y ejecuciones de cada una de las variables en la configuración y calibración del sistema de inspección TOFD, arrojadas como resultado del diseño experimental multinivel. Con la ejecución de este diseño de experimentos, es posible evaluar cuál combinación presenta mejores resultados y cuáles no, bajo las condiciones del presente trabajo.

2.3.2. Diseño de metodología experimental

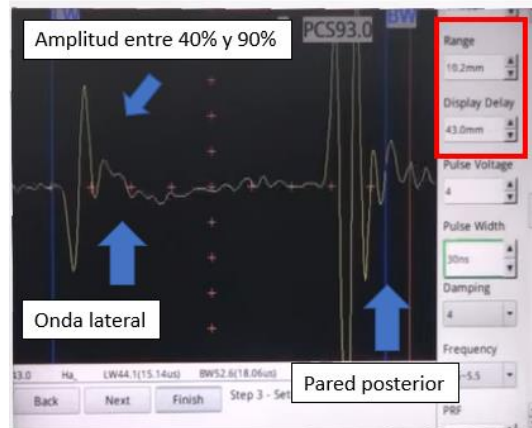
En el presente capítulo se indica el procedimiento experimental propuesto con base en la información presentada anteriormente. En este caso el equipo que se estudió es un *Omniscan mx2*, el cual tiene un módulo que permite inspecciones duales, por ultrasonido *Phased array* (PA2) y dos canales individuales para ultrasonido convencional que son usados para la tecnología *TOFD* (Olympus, 2015). Teniendo en cuenta el equipo mencionado, se diseñó una metodología para la evaluación de la técnica como se muestra a continuación:

En el siguiente paso a paso se presentan las indicaciones estipuladas en el código ASME Sección V artículo 4, Mandatorio apéndice III (2019), el cual especifica las características de equipo, bloques de referencia y ajustes necesarios para la detección de discontinuidades por *TOFD*. Para la siguiente aplicación, se tomó como ejemplo un bloque de 25.4 mm (1 in), con un cordón de soldadura de 35 mm de ancho en la pared superior y 8mm de ancho en la pared posterior, y de material AISI 1018 (Boiler, 2019).

El primer paso consiste en el ajuste de los transductores, los cuales deben estar a una distancia predeterminada. Para ello, primero se selecciona la configuración de la pieza y se ingresan los valores correspondientes al ancho del cordón de la soldadura en la parte superior e inferior, la velocidad acústica del material y el espesor de este (Olympus, 2015). En esta aplicación se tomó como ejemplo transductores de frecuencia 5 MHz y 6 mm de diámetro y ángulo de difracción de 70°. La distancia *PCS* de los transductores se calcula a partir de la ecuación (7) en donde el espesor del bloque es 25.4 mm y el ángulo de difracción de la onda es 70°; para este caso, la distancia es 93.04 mm y se mide desde el centro de cada transductor (Charlesworth, 2002). En el código ASME se piden dos indicaciones, la onda lateral y la onda de pared posterior o eco de fondo, las cuales deben ser ajustadas entre el 40 % y el 90 %. Se realiza el ajuste de tiempo (*Display delay*) y rango de la pantalla, de tal manera que la onda lateral y la pared posterior se visualicen totalmente en el equipo, como se muestra en la figura 10.

Figura 10

Ajuste de rango y Display Delay.



Nota: * La imagen representa la pantalla *Omniscan mx2* de la configuración y ajuste de rango y *Display Delay*, para la visualización de la onda lateral y la pared posterior. Adaptada de (Olympus, 2015).

Para inicial con la inspección del cordón de soldadura, se utiliza el asistente *TOFD Wizard*. Luego se realiza la configuración de la pieza como se muestra en la figura 11, en la cual se especifican los siguientes parámetros:

Tabla 5

Parámetros de configuración para detección de barrenos.

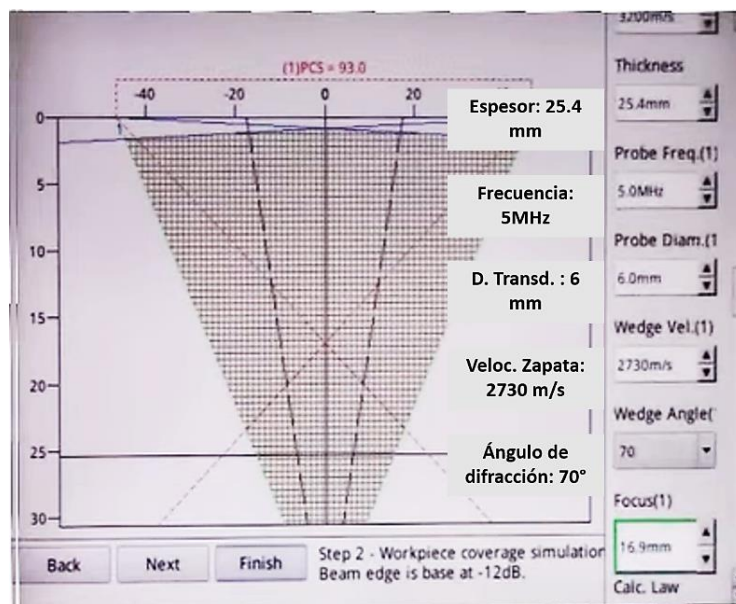
Parámetro	Valor para aplicación	Nota
Ancho del cordón de soldadura parte superior	35 mm	Ingresado por el usuario
Ancho del cordón de soldadura parte inferior	8 mm	Ingresado por el usuario
Tipo de material	Acero AISI 1018	Ingresado por el usuario
Velocidad longitudinal	5826 m/s	Calculado automáticamente a partir del tipo de material
Velocidad transversal	3200 m/s	Calculado automáticamente a partir del tipo de material
Espesor del material	25,4 mm	Ingresado por el usuario
Frecuencia del transductor	5.0 MHz	Ingresado por el usuario
Diámetro del transductor	6 mm	Ingresado por el usuario

Velocidad de la zapata	2730 m/s	Ingresado por el usuario
Ángulo de la Refracción	70°	Ingresado por el usuario
Enfoque	16,9 mm	Calculado automáticamente a partir de los otros parámetros.

Nota: La tabla 6 muestra los parámetros necesarios para la configuración y detección de los barrenos. En ella se especifican datos como el tipo de material, velocidad longitudinal y transversal de las ondas en el material, ancho del cordón de soldadura, frecuencia y diámetro de los transductores y velocidad y ángulo de la zapata.

Figura. 11:

Pantalla de ajuste de parámetros del bloque de inspección.



Nota: * La figura 11 muestra la pantalla de ajuste de los parámetros de configuración de la tabla 6, señalados en el cuadro rojo. Adaptada de (Olympus, 2015).

En el siguiente menú se realiza el ajuste de la onda lateral de acuerdo con el código ASME. Para ello se empieza a ajustar la ganancia de tal forma que se puedan ver las indicaciones de la onda lateral y la pared posterior. El efecto de la ganancia se observa en la figura 12.

Figura 12

Efecto de la ganancia en la amplitud de la señal observada.



Nota: Las líneas azules observadas en los laterales de la pantalla indican los centros de la onda lateral (izquierda, Lateral Wave) y pared posterior (derecha, Back Wall). Adaptada de (Olympus, 2015).

A continuación, se ajusta el *Display Delay* (desplazamiento temporal) y el rango (escalamiento temporal) de tal manera que la onda lateral y la pared posterior queden sobre sus respectivos indicadores. Se puede ajustar el voltaje del equipo (*pulse voltaje*), de tal manera que sea posible reducir la ganancia (mejorando la relación señal a ruido de la onda visualizada). El ajuste se realiza de tal manera que la onda lateral se encuentre entre un 40% y 90% como lo indica la norma. Luego, se selecciona el *encoder*, se escoge la dirección del escaneo (para este caso se utiliza *Backward*) y se guarda el parámetro. Se realiza el escaneo del cordón de soldadura, como se indica en la norma, iniciando el barrido oprimiendo el botón *Start* y empujando los transductores hacia el frente, manteniendo siempre la distancia *PCS* fija. Como se observa en la figura 13 en los cuadros resaltados en rojo, al obtener cualquier señal proveniente de una indicación, se presentarán cebras o líneas a escala de grises en medio de las señales de la onda lateral y el eco de fondo (traza), señaladas como líneas azules.

Figura 13.

Resultado del escaneo de la pieza.

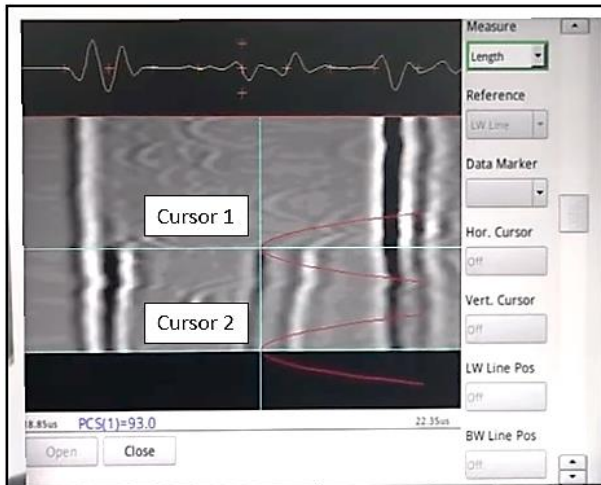


Nota: Resultado del primer escaneo en el cual se ve la señal emitida en medio de las señales de la onda lateral y la pared posterior, por discontinuidades detectadas y señaladas en el cuadro rojo. Adaptada de (Olympus, 2015).

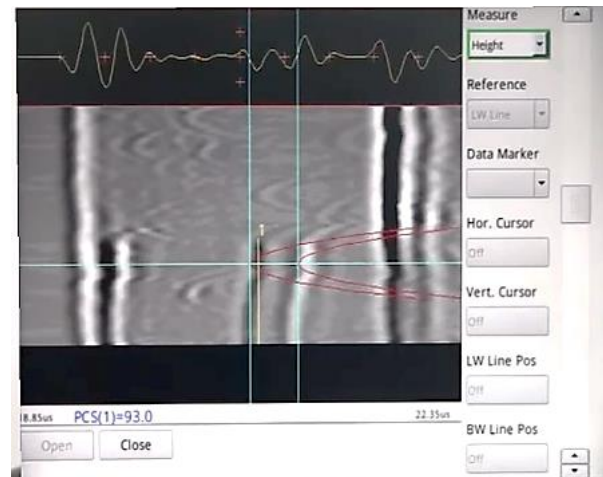
Finalmente, se realiza la medición de las discontinuidades detectadas. Para ello, se selecciona la dirección de la distancia a medir y se utilizan los cursores para delimitar la medición, como se muestra en la figura 14. La opción *Data Marker* con valor de 1 muestra la distancia. El proceso se repite de la misma manera para medir la altura, como se observa en las figuras 14 y 15.

Figura 14.

Configuración de los cursores para la medición de la longitud de la altura de los barrenos.

**Figura 15.**

Configuración de los cursores para la medición de la altura de los barrenos.



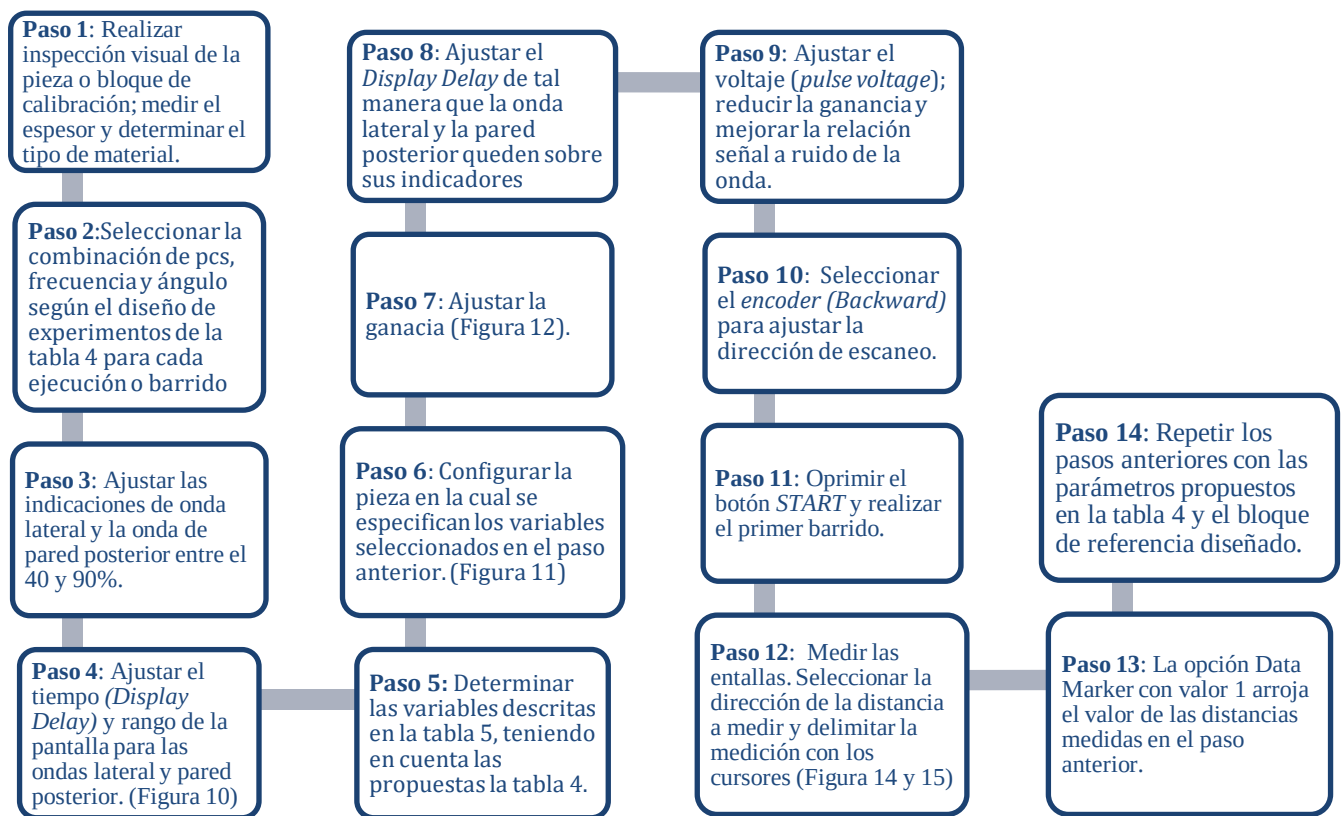
Nota: 14). La opción *Data Marker* con valor de 1 mostrará la distancia, la cual corresponde a 58.3mm. Adaptada de (Olympus, 2015). 15). Se obtiene una medición de altura de 2.6mm, cumpliendo con lo establecido en el código ASME. Adaptada de (Olympus, 2015).

Finalmente, la tabla 4 hace parte de la metodología descrita en este capítulo junto con el bloque de referencia propuesto a continuación. Como se observa en la tabla mencionada, la columna llamada “Altura” hace referencia al resultado obtenido al detectar y medir las discontinuidades inducidas en el bloque de referencia diseñado. El objetivo de esto es poder comparar las alturas detectadas en cada escaneo, y ver como varían los resultados obtenidos, permitiendo así evaluar la precisión y exactitud. Al cambiar los parámetros de PCS, ángulo del haz y frecuencia de los transductores, se podrá evaluar la sensibilidad y la precisión de la técnica. Todo lo anterior está basado en los requerimientos descritos en el código ASME y las normas ASTM e ISO. Adicional a lo anterior, se debe tener en cuenta el uso del acoplador,

cuya función es permitir la transmisión del sonido desde el transductor hasta la pieza en inspección y garantizar la obtención de resultados confiables. (*Acoplante Para Pruebas Ultrasónicas Magnaflux*, 2021). A continuación, en la figura 16 se presenta de manera resumida el paso a paso de la metodología descrita anteriormente.

Figura 16.

Metodología propuesta para la evaluación de la técnica TOFD.



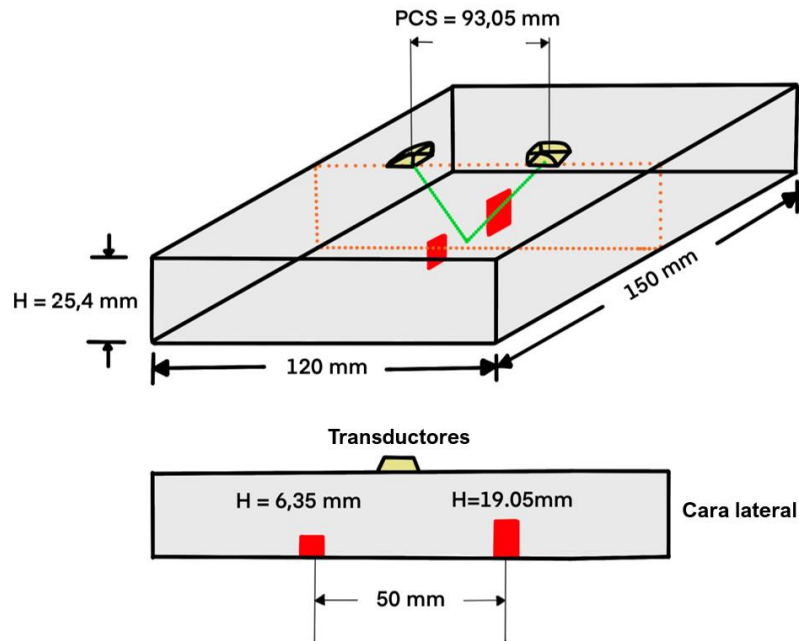
Nota: La metodología propuesta se basa en las recomendaciones del código ASME y las normas ASTM e ISO. Los parámetros propuestos en la tabla 4 permitirán realizar 12 barridos diferentes para al final evaluar la sensibilidad y la precisión de la técnica *TOFD*.

2.4. Diseño del bloque de referencia para la verificación de la técnica TOFD

Para el desarrollo de este capítulo se consideraron todas las especificaciones y requerimientos del código ASME sección V artículo 4, Mandatorio apéndice III y de la norma ASTM E2373: *Standard Practice for Use of the Ultrasonic Time of Flight Diffraction*, y los resultados presentados en capítulos anteriores. Según el código ASME, si el espesor de la pieza a inspeccionar es menor o igual a 100mm, el espesor del bloque debe ser $\pm 10\%$ del nominal, por lo cual se decidió que el bloque diseñado tendría un espesor de 25.4mm (1 pulgada) (Boiler, 2019). El bloque debe tener la longitud adecuada para que permita que los transductores se muevan por toda la superficie de análisis, por lo cual para este caso es 1500mm (ASTM International, 2004). Igualmente, para el ancho del bloque se tuvieron en cuenta las distancias PCS que se calcularon en la tabla 5 a partir de la ecuación (7), por lo cual, para este caso se determinó que sería 120mm.

Las discontinuidades inducidas en el bloque de referencia deben estar a distancias de $\frac{1}{4}$ mm y $\frac{3}{4}$ mm de la altura del bloque, medidas desde la pared posterior, por lo cual, para este caso sus alturas son 19.05 mm y 6.35 mm, respectivamente (figura 16).

En el diseño del bloque se tuvo en cuenta también el tipo de material y el costo de la fabricación de este, por lo cual para esta aplicación se decidió que sería de acero AISI 1018 (acero al carbono); este tipo de acero es uno de los más comerciales en el mercado. La figura 15 muestra el boceto para el diseño del bloque de calibración propuesto.

Figura 17.*Diseño del bloque de calibración propuesto.*

Nota: Las discontinuidades inducidas en el bloque se ven representadas de color rojo, y están ubicadas sobre la línea central del bloque, una detrás de la otra como se observa en la cara lateral de este (Imagen inferior).

3. Conclusiones

Se definieron las principales variables que afectan la sensibilidad, precisión y exactitud de la técnica *TOFD* y su rango de valores empleados; estas variables son el espesor, distancia entre transductores (*PCS*), el ángulo del haz difractado y la frecuencia. Así mismo, se identificó el espesor como la variable que determina la configuración del equipo, al estar relacionada con la distancia entre los transductores y la frecuencia.

Se presentó el diseño de una metodología experimental teniendo en cuenta el diseño de experimentos y las indicaciones del código ASME. sección 5, artículo 4, apéndice 3 para la correcta ejecución de la toma de datos referentes al tamaño de las discontinuidades en soldaduras, incluyendo la calibración y la forma de medición mediante el uso de la técnica *TOFD*. Las mediciones se realizaron teniendo las discontinuidades en el centro del haz, sin desplazamiento frontal del palpador.

Se diseñó un bloque de referencia partiendo de la normativa del código ASME sección 5, artículo 4, apéndice 3 con dos entallas de diferente profundidad. La cantidad de entallas, la profundidad de estas, el material del bloque, la frecuencia de los transductores y el ángulo de la zapata fueron seleccionados teniendo en cuenta el factor económico y la cobertura del análisis.

Se identificaron causas externas que podrían afectar la correcta toma e interpretación de los datos como el medio acoplador, las propiedades intrínsecas de ciertos materiales que añaden ruido a las imágenes resultantes y, principalmente, el factor humano y la experiencia del inspector.

Referencias Bibliográficas

Acoplante para Pruebas Ultrasónicas | Magnaflux. (n.d.). Retrieved September 29, 2021,

from <https://magnaflux.mx/Productos/Acoplante-Ultrasonicos.htm>

ASTM International. (2004). *Standard Practice for Use of the Ultrasonic Time of Flight*

Diffraction (TOFD). i(C), 1–12. <https://doi.org/10.1520/E2373>

Barrera Suarez, L. P., & Coronel Picón, M. M. (2011). Desarrollo y procedimientos para la

utilización de técnicas de ensayos no destructivos con ultrasonidos para inspección de tuberías. *Phys. Rev. E*, 24.

http://ridum.umanizales.edu.co:8080/jspui/bitstream/6789/377/4/Muñoz_Zapata_Adriana_Patricia_Artículo_2011.pdf

Birring, A. S., & Nde, B. (n.d.). *TOFD Principle , Limitations , Calibration and Inspection*.

Boiler, A. (2019). *Section v 2019*.

Burger, B., & Fuchs, M. (2005). Introduction to Phased Array Ultrasonic Technology

Applications. In *Olympus NDT Advanced Practical NDT Series* (Vol. 4, Issue 1).

Centurion XIX - Programa para su evaluación - Statgraphics. (n.d.). Retrieved September

29, 2021, from <https://statgraphics.net/descargas-centurion-xviii/>

Charlesworth. (2002). *Engineering applications of ultrasonic time-of-flight diffraction* (Vol.

148).

CIVA - Experimental characterization - TOFD - Top edge of vertical notch. (n.d.). Retrieved

September 28, 2021, from <https://www.extende.com/ut-tofd-results-on-the-top-edge-of-vertical-notch>

Delacoux, D., Trevin, S., & Caylar, P. (2012). *Weld Root Measurement by ToFD for*

Inspection of Flow-Accelerated Corrosion Susceptible Welds. April, 16–20.

Detector de defectos por ultrasonido multielemento (Phased Array) OmniScan X2. (n.d.).

- Retrieved September 28, 2021, from <https://www.olympus-ims.com/es/omniscan-mx2/>
- Ensayos por Ultrasonidos | SCI.* (n.d.). Retrieved September 28, 2021, from <https://scisa.es/ensayos-no-destructivos-y-laboratorio-metalurgico/ensayos-no-destructivos/inspeccion-por-ultrasonidos/>
- Gallardo, J., Romero, B., & Romero, E. (2017). *DEVELOPMENT OF AN EDUCATION AND TRAINING PROGRAMME TO TEST PIECES BY MEANS OF TOFD AND PHASED ARRAY TECHNIQUES*. 59–63.
- Introduction to TOFD 1.0.* (n.d.). Retrieved September 29, 2021, from <https://customer-eddyfitechnologies.talentlms.com/learner/courseinfo/id:196>
- Karpel'son, E. A., & Gusev, E. A. (1991). Acoustic soliton and ultrasonic inspection problems. *The Soviet Journal of Nondestructive Testing*, 27(7), 439–445.
- Kotouzas, K., & Pitteris, D. (2018). *Comparative Analysis of Conventional Ultrasonics – Phased Array UT & TOFD in Weld Inspection*. October, 22–23.
- Marks, P. T. (n.d.). *ultrasonic-testing.pdf*. The American Society for Nondestructive Testing, Inc.
- Martín, C. J., González, R., Giacchetta, R., & Moreno, E. (2007). ULTRASCOPE TOFD : un sistema compacto para la captura y procesamiento de imágenes TOFD. *Aaende*, 1–20. <http://www.ndt.net/article/panndt2007/papers/153.pdf>
- Martínez, A. R., Hernández, M., & García, E. F. F. (2012). Formación de imágenes ultrasónicas por Difracción de Tiempo de Vuelo (TOFD). *Intekhnia*, 6(1). <http://revistas.usta.edu.co/index.php/intekhnia/article/view/464>
- Mayworm, R. C., Alvarenga, A. V., & Costa-Felix, R. P. B. (2021). A metrological approach to the time of flight diffraction method (ToFD). *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 167(December 2017), 108298. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108298>

- Mayworm, Ruan C., Alvarenga, A. V., & Costa-Felix, R. P. B. (2015). A Metrological Based Realization of Time-of-Flight Diffraction Technique. *Physics Procedia*, 70, 590–593.
<https://doi.org/10.1016/J.PHPRO.2015.08.029>
- Mohseni, E., Javadi, Y., Sweeney, N. E., Lines, D., MacLeod, C. N., Vithanage, R. K. W., Qiu, Z., Vasilev, M., Mineo, C., Lukacs, P., Foster, E., Pierce, S. G., & Gachagan, A. (2021). Model-assisted ultrasonic calibration using intentionally embedded defects for in-process weld inspection. *Materials and Design*, 198.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.109330>
- Non Destructive Testing - Ultrasonic Testing*. (n.d.). Retrieved September 28, 2021, from http://www.wermac.org/others/ndt_ut.html
- Olympus. (2015). *Software OmniScan MXU*.
- Petcher, P. A., & Dixon, S. (2015). Weld defect detection using PPM EMAT generated shear horizontal ultrasound. *NDT and E International*, 74, 58–65.
<https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2015.05.005>
- Sanchez Moreno, B. (2014). *Desarrollo de un sistema ultrasónico TOFD configurable*.
- Segura, D., & Rodríguez, A. (2012). Sistema De Formación De Imágenes Tofd Para Ensayos No Destructivos Tofd Imaging System in Nondestructive Tests. *Revista EIA*, 17(c), 139–149. <http://www.scielo.org.co/pdf/eia/n17/n17a11.pdf>
- Society, B., Journal, N. D. T. I., Days, N. D. T., Mirchev, Y. N., Chukachev, P. H., Mihovski, M. M., & Yanev, P. A. (2018). *Automatic Systems for Ultrasonic Inspection of Pipelines (survey)*. I(1), 27–37.
- Software UTman600*. (n.d.). Retrieved September 29, 2021, from <http://www.utsim.co.uk/>
- Sondas y suelas (zapatas) TOFD*. (n.d.). Retrieved October 5, 2021, from <https://www.olympus-ims.com/es/ultrasonic-transducers/tofd/>
- The British Standard Institution, B. S. L. (2003). Non- Destructive Testing of Welds-

Ultrasonic Testing- Characterization of Indications in Welds. *Records Management Journal*, 1(2), 1–15.

<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.88.5042&rep=rep1&type=pdf>
%0Ahttps://www.ideals.illinois.edu/handle/2142/73673%0Ahttp://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-

33646678859&partnerID=40&md5=3ee39b50a5df02627b70c1bdac4a60ba%0Ahtt

The British Standard Institution, B. S. L. (2011). *INTERNATIONAL STANDARD Non-destructive testing of welds — diffraction technique (TOFD). 2011.*

The British Standard Institution, B. S. L. (2014). *BSI Standards Publication Non-destructive testing — Ultrasonic testing — Time-of- flight diffraction technique as a method for detection and sizing of discontinuities (ISO.*

The British Standard Institution, B. S. L. (2018). *BS EN ISO 12216 : 2018 BSI Standards Publication.*

Yeh, F. W. T., Lukomski, T., Haag, J., Clarke, T., Stepinski, T., & Strohaecker, T. R. (2018). An alternative Ultrasonic TimeofFlight Diffraction (TOFD) method. *NDT & E International*, 100, 74–83. <https://doi.org/10.1016/J.NDTEINT.2018.08.008>