

Evaluación sobre la sensibilidad y resolución a sistemas de inspección de corrosión por mapeo

C-Scan con la técnica Phased Array Ultrasonic Testing PAUT.

Daniel Felipe González Manrique

Francisco José Fuentes Flórez

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Metalúrgico

Directora

Ana María Pérez Ceballos

Ph.D. En Ingeniería

Codirector

Carlos Andrés Galán Pinilla

Ph.D. En Ingeniería de Materiales

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingeniería Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales

Bucaramanga

2024

Dedicatoria

Dedicamos este proyecto a nuestros padres por acompañarnos en cada paso que damos en la búsqueda de ser mejores personas y profesionales; a mis hermanos, por todo su apoyo incondicional; a nuestros directores de proyecto por la entrega de sus conocimientos para la realización del proyecto satisfactoriamente.

Agradecimientos

Agradecemos a toda nuestra familia, amigos y compañeros de estudio que nos acompañaron durante todo el trayecto académico brindándonos su apoyo y ayuda en cada dificultad presentada.

A todo el personal docente y técnicos de la escuela de Ingeniera Metalúrgica y Ciencia de los Materiales, que nos brindaron la preparación necesaria para obtener nuestro título como Ingeniero Metalúrgico, a la profesora Ana María Pérez Ceballos y al profesor Carlos Andrés Galán Pinilla por compartir su conocimiento, por su paciencia y dedicación para realizar satisfactoriamente nuestro proyecto de grado.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción.....	15
1. Marco Teórico.....	16
1.1 Generalidades de Ensayos No Destructivos	16
1.2 Generalidades de inspección por Ultrasonido.....	16
1.3 END por Ultrasonido <i>Phased Array Ultrasonic Testing (PAUT)</i>	17
1.3.1 END por Ultrasonido Phased Array Ultrasonic Testing: Principio físico.....	18
1.4 Formación de imágenes del sistema de inspección <i>PAUT</i>	19
1.5 Mecanismos de daño en tuberías.....	20
2. Objetivos.....	22
2.1 Objetivo General	22
2.2 Objetivos Específicos	22
3. Metodología.....	23
3.1. Etapa 1: Realizar la revisión bibliográfica.....	23
3.2 Etapa 2: Elaborar muestras de estudio.....	30
3.2.1 Actividad 1: Realizar el diseño del bloque patrón con las respectivas especificaciones.	33
3.2.2 Actividad 2: Fabricar el bloque patrón de acuerdo al diseño.....	34
3.3 Etapa 3: Definir un método de inspección para <i>PAUT</i> en el equipo Olympus OmniScan MX2	35
3.3.1 Actividad 1: Realizar la calibración del equipo con diferentes configuraciones.	35
3.3.2 Actividad 2: Establecer y verificar un método de calibración.	37
3.4 Etapa 4: Ejecutar mediciones de las discontinuidades mediante la técnica <i>PAUT</i>	39

EVALUAR LA SENSIBILIDAD Y RESOLUCIÓN DE LA TÉCNICA PAUT

	5
4. Resultados.....	40
4.1 Diseño del bloque de estudio con discontinuidades artificiales.....	40
4.2 Medición de las discontinuidades.	43
4.3 Calibración del equipo y dimensionamiento de las discontinuidades.....	46
4.4 Mediciones de las discontinuidades mediante la técnica <i>PAUT</i>	49
5. Conclusiones.....	61
6. Recomendaciones.....	62
Referencias Bibliográficas.....	63
Apéndices	67

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. <i>Mecanismos de daño presentes en tuberías del transporte de hidrocarburos.</i>	25
Tabla 2. <i>Representación visual de los mecanismos de daño presentes en tuberías del transporte de hidrocarburos.</i>	28
Tabla 3. <i>Normas utilizadas en el proyecto.</i>	30
Tabla 4. <i>Factores para el diseño de experimentos.</i>	31
Tabla 5. <i>Información sobre el diseño factorial de múltiples niveles.</i>	32
Tabla 6. <i>Barridos del diseño de experimentos.</i>	32
Tabla 7. <i>Dimensiones del bloque y las discontinuidades.</i>	40
Tabla 8. <i>Medidas para el diseño de las discontinuidades.</i>	41
Tabla 9. <i>Mediciones realizadas con el microscopio.</i>	44
Tabla 10. <i>Variables de calibración.</i>	46
Tabla 11. <i>Datos suministrados por el Olympus OmniScan mediante la técnica PAUT.</i>	53
Tabla 12. <i>Medidas de tendencia central de la profundidad de la discontinuidad.</i>	54
Tabla 13. <i>Medidas de tendencia central del diámetro de la discontinuidad.</i>	54
Tabla 14. <i>Número de datos por fuera del rango de cada discontinuidad.</i>	58
Tabla 16. <i>Diseño de experimentos aleatorizado completo.</i>	67
Tabla 17. <i>Datos recolectados del OmniScan mediante PAUT.</i>	71

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. <i>Estructura básica de un palpador PAUT.</i>	17
Figura 2. <i>Comparación entre ultrasonido convencional y PAUT.</i>	18
Figura 3. <i>Imágenes de señales C-Scan usando PAUT.</i>	20
Figura 4. <i>Metodología del proyecto.</i>	23
Figura 5. <i>Equipo Olympus OmniScan MX2.</i>	36
Figura 6. <i>Kit HST-X04 de Olympus.</i>	37
Figura 7. <i>Ejemplificación de la toma de dimensiones en las discontinuidades trabajadas.</i>	39
Figura 8. <i>Diseño del bloque con sus medidas y resultado final del bloque con sus caras.</i>	42
Figura 9. <i>Bloque de acero diseñado y mecanizado.</i>	43
Figura 10. <i>Microscopio Hirox KH-7700.</i>	43
Figura 11. <i>Mediciones del diámetro en el bloque con el microscopio Hirox KH-7700.</i>	45
Figura 12. <i>Reconstrucción 3D y mediciones de profundidad con el microscopio Hirox KH-7700.</i>	45
Figura 13. <i>Procedimiento seguido para la calibración del equipo en base al bloque diseñado.</i>	47
Figura 14. <i>Representación del barrido para PAUT parte 1.</i>	48
Figura 15. <i>Dimensionamiento de la discontinuidad correspondiente a la parte 2.</i>	49
Figura 16. <i>Discontinuidad tipo erosión con planes de inspección diferentes en el C-Scan.</i>	50
Figura 17. <i>Discontinuidad tipo cavitación, con planes de inspección diferentes en el C-Scan.</i> ..	51
Figura 18. <i>Interfaz del A-Scan, E-Scan y C-Scan de la discontinuidad tipo erosión.</i>	52
Figura 19. <i>Diagrama de Pareto de la profundidad y diámetro del primer nivel de la discontinuidad tipo erosión.</i>	56

Figura 20. <i>Resultados del diagrama de Pareto resumido.</i>	57
Figura 21. <i>Porcentaje de variación entre la media y el valor de referencia</i>	59
Figura 22. <i>Imágenes de la inspección para cada discontinuidad focalización 14mm.</i>	69
Figura 23. <i>Imágenes de la inspección para cada discontinuidad Focalización 5mm.</i>	69
Figura 24. <i>Diagramas de Pareto completos de la profundidad.</i>	74
Figura 25. <i>Diagramas de Pareto para el diámetro</i>	75

Lista de Apéndices

	pág.
Apéndice A. Diseño de experimentos aleatorizado.....	67
Apéndice B. Imágenes de la Interfaz del OmniScan.....	68
Apéndice C. Datos recolectados de cada barrido realizado.....	71
Apéndice D. Diagrama de Pareto para las discontinuidades 2-6.	73

Glosario

Ancho de banda: La porción de la respuesta de la frecuencia que se sitúa entre los límites de amplitud se conoce como ancho de banda. (Olympus Corporation, sf).

Apertura virtual: Se refiere al ancho del elemento de la sonda o conjunto de elementos que son impulsados de forma simultánea. (Mobius Institute, 2022).

A-Scan: Representación gráfica de una onda ultrasónica que muestra la amplitud en relación con el tiempo. Puede ser rectificada o sin rectificación (RF). (Olympus Corporation, sf).

B-Scan: Imagen bidimensional de datos ultrasónicos que representa la profundidad o distancia del reflector con respecto a la posición del haz. (Mobius Institute, 2022).

Calibración: La calibración significa utilizar un estándar de medición, para determinar la relación entre el valor mostrado por el instrumento de medición y el valor verdadero. (ASNT, 2012).

Calibración de retardo de suela (zapata): Procedimiento que electrónicamente corrige las diversas trayectorias acústicas tomadas por distintos componentes del haz en una suela, utilizado para estandarizar la longitud de la trayectoria acústica medida en un reflector. (Mobius Institute, 2022).

Calibración de sensibilidad: Método que electrónicamente ajusta de manera uniforme la respuesta de la amplitud en cada componente del haz durante un escaneo. Este proceso generalmente compensa las variaciones de sensibilidad de elemento a elemento y la transferencia de energía variable en diferentes ángulos refractados. (Olympus Corporation, sf).

Codificador (*encoder*): Es un dispositivo que genera pulsos, donde convierte la longitud del objeto en impulsos eléctricos. (Guzman, 2018).

C-scan: Imagen bidimensional de la amplitud ultrasónica o de los datos tiempo/profundidad proyectados como una vista superior de la pieza bajo ensayo. (Olympus Corporation, sf).

Discontinuidades: Se definen por lo general como “una interrupción en la estructura física o configuración de una pieza bajo examen” la cual puede o no, estar en detrimento para lo que fue construido o diseñado. (Guzman, 2018) (ASTM INTERNATIONAL, 2023).

Duración del impulso: Es el lapso de tiempo entre el momento en que el borde de entrada de una forma de onda alcanza una amplitud determinada y el punto en que el borde de salida de la misma forma de onda logra la misma amplitud. La duración del impulso está fuertemente influenciada por su configuración. (ASNT, 2012).

Enfoque (focalización): Es el punto en el que un haz acústico converge hacia el diámetro mínimo y máxima presión acústica, y más allá del cual el haz diverge. (Guzman, 2018).

Frecuencia: Es el número de oscilaciones de la partícula vibrante por segundo o se puede decir también que es el número de ciclos de una onda por unidad de tiempo. (ASNT, 2012).

Leyes focales: Configuración predeterminada de retrasos implementada en la emisión y recepción de los elementos individuales de una sonda *PAUT* con el fin de orientar/enfocar el haz acústico resultante y la respuesta del eco. (Guzman, 2018).

Mecanizado: El mecanizado es el conjunto de procesos industriales (corte, marcado, prensado, agujereado, etc.) realizados en una pieza de materia prima (generalmente metálica, pero también puede ser de cerámica, madera o plástico, entre otros) para darle una forma y tamaño final deseados limando el material sobrante de forma controlada. (Planes, 2016).

Paso: Separación entre elementos individuales en una sonda *PAUT*. (Olympus Corporation, sf).

Resolución angular: Es el valor angular mínimo entre dos *A-Scan* cuyos defectos adyacentes, ubicados en la misma profundidad, puede ser identificados de forma individual. (Mobius Institute, 2022).

Resolución axial: Es la mínima distancia en profundidad entre dos reflectores específicos que permite la identificación discreta de cada uno. Normalmente, el aumento en la frecuencia o en el ancho de banda tiende a incrementar la separación axial. (Guzman, 2018).

Resolución lateral: Se refiere a la distancia lateral mínima entre dos reflectores específicos que permite la identificación discreta de cada uno. Esta consideración está vinculada tanto al diseño de la sonda *PAUT* como a la programación de la ley focal elegida. (Mobius Institute, 2022).

Sensibilidad: Es la relación entre la amplitud del impulso de excitación y aquella del eco recibido a partir del objetivo determinado (Olympus, sf).

Transductor: Es la parte que emite y recibe las señales de onda ultrasónica que proporcionan la información que se requiere cuando se buscan discontinuidades o se miden los espesores de un material. (Paulina & Edwin, sf).

Zapatas: Las zapatas (suelas) están diseñadas para efectuar escaneos manuales. Son bloques de plástico, como el rexolite, planos que se usan para acoplar la energía acústica (y para proteger la parte frontal de la sonda de rasguños o abrasión) en escaneos lineales rectos. (Olympus, sf).

Resumen

Título: Evaluación sobre la sensibilidad y resolución a sistemas de inspección de corrosión por mapeo *C-Scan* con la técnica *Phased Array Ultrasonic Testing PAUT**

Autor: Daniel Felipe González Manrique, Francisco José Fuentes Flórez**

Palabras Clave: Ensayos No Destructivos, Mecanismos de Daño, Discontinuidades, *Phased Array Ultrasonic Testing*, Calibración, Sensibilidad, Resolución, Ultrasonido, Mecanizado.

Descripción: Este trabajo de investigación aborda la evaluación de la sensibilidad y resolución de mediciones realizadas con la técnica de inspección *Phased Array Ultrasonic Testing (PAUT)* utilizando un bloque patrón de acero al carbono ASTM A36. Para este propósito, se diseñó y fabricó un bloque patrón con discontinuidades ideales inducidas por mecanizado para simular daños por corrosión. El patrón, que consta de dos caras, presenta diferentes morfologías, profundidades, diámetros y ubicaciones de discontinuidades, las cuales fueron inducidas mediante electroerosión por penetración (*EDM*) y torneado *CNC*. Previo a realizar mediciones se realizó la calibración del equipo *OmnisScan MX2*, utilizando un bloque de calibración *IIW* para la velocidad y el bloque patrón para los demás parámetros, seguidamente se ejecutaron mediciones a través de un diseño de experimentos factorial multinivel, con planes de inspección que modificaban los factores de interés. Los resultados permitieron dimensionar y localizar las discontinuidades en el bloque. El análisis de datos evidenció la influencia significativa de ciertos factores en la sensibilidad y resolución de la técnica. Además, se llevó a cabo un análisis estadístico que identificó los barridos fuera del rango aceptable y el porcentaje de variación en la detección de discontinuidades en comparación con los valores de referencia.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales. Director: Ana María Pérez Ceballos. PhD. En Ingeniería. Codirector: Carlos Andrés Galán Pinilla PhD. En Ingeniería de Materiales.

Abstract

Title: Evaluation about the sensitivity and resolution of corrosion inspection systems by *C-Scan* mapping with the *Phased Array Ultrasonic Testing PAUT technique* *

Author(s): Daniel Felipe Gonzalez Manrique, Francisco Jose Fuentes Florez**

Key Words: Non-destructive testing, Damage mechanisms, Discontinuities, *Phased Array Ultrasonic Testing*, Calibration, Sensitivity, Resolution, Ultrasound, Machining.

Description: This Research work addresses the evaluation of the sensitivity and resolution of measurements made with the phased array ultrasonic testing (PAUT) inspection technique using an ASTM A36 carbon steel gauge block. For this purpose, a gauge block was designed and fabricated with ideal machining-induced discontinuities to simulate corrosion damage. The gauge block, which consists of two faces, presents different morphologies, depths, diameters and locations of discontinuities which were induced by Electrical Discharge Machining (EDM) and CNC turning. Before carrying out the measurements, the OmniScan MX2 equipment was calibrated using an IIW calibration block for velocity and the gauge block for the other parameters. Measurements were then carried out through a multilevel factorial design of experiments with inspections plans that modified the factors of interest. The results allowed us to size and locate the discontinuities in the block. The data analysis showed the significant influence of certain factors on the sensibility and resolution of the technique. In addition, a statistical analysis was carried out that identified scans out of the acceptable range and the percentage of variation in the detection of discontinuities compared to reference values.

* Degree Work

**Facultad de Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales. Advisor: Ana María Pérez Ceballos. PhD. in Engineering. Coadvisor: Carlos Andrés Galán Pinilla. PhD. in Materials Engineering.

Introducción

Los Ensayos No Destructivos (END) son pruebas realizadas en materiales o piezas durante su fabricación o servicio sin alterar sus propiedades (Schmerr Jr, 2004). Permiten obtener información sobre el componente, identificar mecanismos de daño por corrosión y/o detectar discontinuidades que comprometan la integridad en operación (Santos De La Cruz et al., 2014). La técnica *Phased Array Ultrasonic Testing* (PAUT, por sus siglas en inglés) es avanzada y se utiliza para la detección oportuna de estas discontinuidades (Sampath et al., 2021). Es una técnica versátil con amplia aplicación en inspección y medición (Olympus Corporation, 2023).

PAUT ofrece visualizaciones bidimensionales en tiempo real y la capacidad de realizar diversos barridos simultáneamente, la cual puede operar a cero grados y con múltiples ángulos de refracción utilizando una sola zapata. Para inspecciones semiautomáticas el registro de datos durante el barrido se realiza con un *encoder* de posicionamiento que se ajusta al palpador y registra la distancia que recorre a lo largo de la pieza. Este *encoder* sincroniza el registro de información con el movimiento del palpador para posicionamiento y dimensionamiento de las discontinuidades en el eje de escaneo (Maquinas y Herramientas, 2017). Aunque tiene ventajas, se han registrado dificultades debido a variaciones en la sensibilidad y resolución, generando incertidumbre en los datos obtenidos, condición relacionada tanto por la versatilidad y complejidad, como por la configuración y calibración de las variables de inspección para cada aplicación (Rimoldi & Mundo, 2020). Teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente este trabajo se centró en implementar configuraciones de inspección con la técnica PAUT y evaluar su efecto, identificando aquellas con menor variación al comparar sensibilidad y resolución en mapeos C-Scan sobre el bloque diseñado y fabricado con daños ideales.

1. Marco Teórico

1.1 Generalidades de Ensayos No Destructivos

Los Ensayos No Destructivos (END) desempeñan un papel fundamental al examinar el estado de diversos materiales sin causar alteraciones permanentes en sus propiedades físicas, químicas, mecánicas y dimensionales (Ferrer-Dalmau, 2019). Cuando se realizan inspecciones durante el proceso de fabricación, el objetivo es confirmar la calidad de las piezas y garantizar que cumplan con las normativas necesarias para su funcionamiento adecuado. Durante el servicio, los componentes se someten a inspecciones programadas periódicamente para evaluar su capacidad de continuar en funcionamiento de manera segura. Para llevar a cabo estos ensayos de manera efectiva, se requiere el uso de secuencias de calibración y estándares como punto de referencia para comparar y asegurar los resultados obtenidos. Diversas entidades, como ASME, ASTM, AWS y API, entre otras, proporcionan normativas y códigos de fabricación relevantes en este contexto. (Olympus Corporation, 2023).

1.2 Generalidades de inspección por Ultrasonido

Los ensayos que entran dentro de esta clasificación basan su funcionamiento en la aplicación de ondas ultrasónicas viajeras, de alta frecuencia, que se desplazan a lo largo de un medio hasta que se topan con otro medio de diferente impedancia acústica (discontinuidades o zonas límite entre materiales); en consecuencia, dichas ondas se reflejan en dirección a la fuente emisora. Las reflexiones producidas permiten medir y conocer el espesor de una pieza y, al mismo tiempo, hacen posible determinar la presencia de discontinuidades y pérdidas de material producto de la corrosión (Santos De La Cruz et al., 2014).

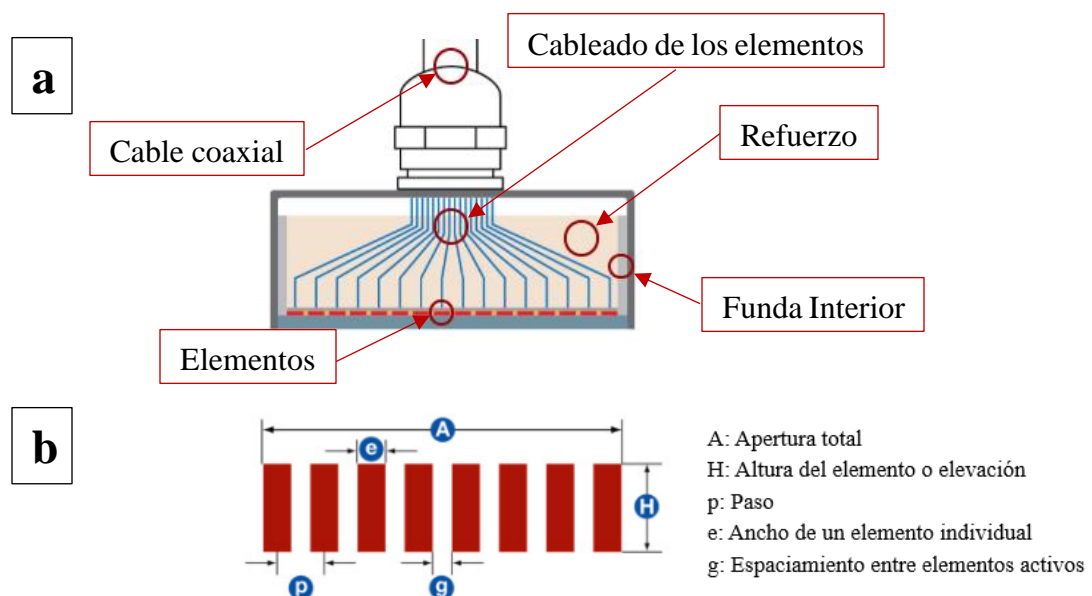
1.3 END por Ultrasonido Phased Array Ultrasonic Testing (*PAUT, por sus siglas en inglés*)

Los transductores típicos utilizados en END con ultrasonido convencional generalmente están compuestos por un único elemento activo que se encarga de generar y recibir ondas de sonido de alta frecuencia. En algunos casos, pueden constar de un par de elementos, denominados duales, uno dedicado a la transmisión y otro a la recepción.

Por otro lado, los transductores de *PAUT* (ver Figura 1) se componen de un arreglo de elementos controlados, los cuales tienen desde 16 hasta un máximo de 256 elementos piezoeléctricos. Estos elementos suelen estar organizados en una matriz, como los de tipo lineal, entre otros. Al igual que los transductores convencionales, los palpadores *PAUT* pueden diseñarse para su empleo en contacto directo, formando parte de un conjunto con ángulo de haz mediante una cuña (zapata), o para su utilización en inmersión, donde el acoplamiento del sonido se logra a través de una columna de agua. Las frecuencias típicas de estos transductores se sitúan comúnmente en el rango de 2 MHz a 10 MHz (Fuquen Sanabria, 2014).

Figura 1.

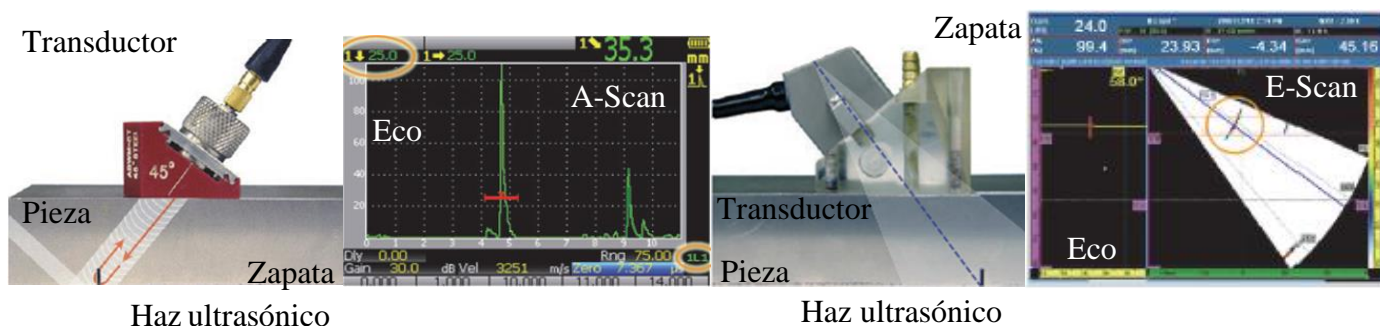
Estructura básica de un palpador PAUT. Autor



En contraste con los detectores de defectos convencionales, los sistemas *PAUT* tienen la capacidad de desplazar un haz de sonido a través de varios ángulos refractados a lo largo de una trayectoria lineal o de enfocarse dinámicamente en diversas profundidades. Este enfoque incrementa la flexibilidad y la eficacia de las configuraciones utilizadas en inspecciones. (Non Destructive Testing, 2022). En la Figura 2, la parte (a) ilustra el proceso de ultrasonido convencional, mientras que en la parte (b) se representa el funcionamiento básico de *PAUT*.

Figura 2.

Comparación entre ultrasonido convencional y PAUT.



Nota. (a) Ultrasonido convencional. (b) Ultrasonido *PAUT*. Tomado y adaptado de: (Schmerr Jr, 2004).

1.3.1 END por PAUT: Principio físico.

Un sistema *PAUT* (arreglo de fases) genera leyes focales con retardo de tiempo específico para cada cristal que permite generar un frente de onda resultante de la combinación de estas interacciones. Esta variación permite que los frentes de onda individuales generados por cada elemento de la matriz se combinen entre sí para añadir o cancelar la energía de forma predecible que orientan y/o focalizan el haz de sonido (Thompson & Begum, 2017).

Este proceso implica la generación de un pulso a través de cada elemento del palpador en momentos ligeramente diferentes. El software determina los tiempos de retardo específicos para activar cada grupo de elementos, con el fin de lograr la forma deseada del haz, teniendo en cuenta las características del palpador y la zapata, así como la geometría y las propiedades acústicas del material en prueba (Schmerr Jr, 2004).

La secuencia de pulsos se elige y programa mediante el software del instrumento. Luego, se transmiten múltiples frentes de onda al material de prueba, los cuales se combinan para formar un frente de onda primario. Este frente de onda se refleja en discontinuidades y límites de materiales, como lo haría una onda ultrasónica convencional.

Durante la recepción, las ondas reflejadas se dirigen hacia los elementos del transductor, luego las respuestas de cada cristal piezoeléctrico se registran y se suman coherentemente tras aplicar un retardo adecuado para corregir tiempos de vuelo. A diferencia de transductores convencionales, *PAUT* puede organizar el frente de onda espacialmente, considerando la hora de llegada y amplitud en cada elemento. Cada ley focal, procesada por el software, representa la reflexión de un componente angular del haz, un punto a lo largo de una trayectoria lineal o una reflexión de una profundidad focal específica (Fuquen Sanabria, 2014).

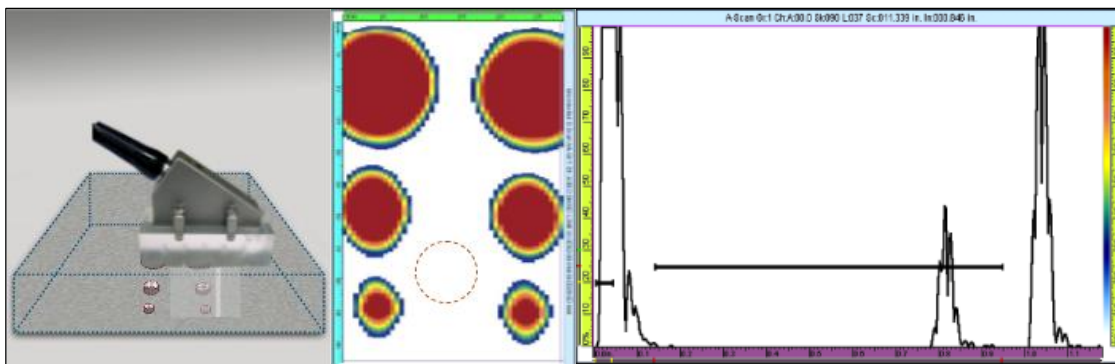
1.4 Formación de imágenes del sistema de inspección *PAUT*

La sonda física se desplaza a lo largo de un eje mientras que electrónicamente el haz escanea conforme la secuencia de la ley focal. Los datos de amplitud o profundidad se recolectan dentro de la región de interés controlada, similar a los *C-Scan* de ultrasonido convencional. En el caso del ultrasonido multielemento (*PAUT*), los datos se trazan con cada progresión de la ley focal mediante la apertura programada del haz.

En la Figura 3 se presenta un escaneo en curso de un bloque de calibración, utilizando una sonda de matriz lineal codificada de 5 MHz con 64 elementos y una zapata recta. Cada ley focal utiliza 16 elementos formando la apertura, incrementándose en uno el salto en cada pulsación. Esto da como resultado 49 puntos de datos trazados a lo largo de los 37 mm (1.5 pulgadas) de longitud de la sonda. Al mover la sonda en línea recta sobre el eje de escaneo, se visualiza un plano *C-Scan*. Los codificadores se utilizan para una correspondencia geométrica precisa, aunque los escaneos manuales no codificados también pueden ser útiles en muchos casos (Olympus Corporation, sf).

Figura 3.

Imágenes de señales C-Scan usando PAUT.



Nota. Diagrama de la medición C-Scan PAUT. Tomado y adaptado de: (Olympus Corporation, sf).

1.5 Mecanismos de daño en tuberías

La corrosión, de forma generalizada, se refiere al deterioro o desgaste sufrido por un material debido a la reacción química que produce dicho elemento al entrar en contacto con el ambiente; siendo una de las principales problemáticas que deben ser combatidas por parte de dueños y operadores. Las reacciones que actúan en el fenómeno de la corrosión son reacciones

electroquímicas que involucran la transferencia de carga del metal y el electrolito. (Vanaei, Eslami, & Egbewande, 2017).

Existen diversos tipos de corrosión, siendo uno de los más comunes la denominada corrosión uniforme o generalizada que, se refiere a aquella que puede encontrarse distribuida uniformemente sobre la superficie de un material, este tipo de corrosión normalmente se puede observar en zonas o secciones aisladas a lo largo de una tubería (Salazar-Jiménez, 2015); la presencia de diferentes fases e impurezas en el material influyen altamente la generación de productos de corrosión, lo cual se traduce en una variación sobre su potencial, generando la formación de pares galvánicos (Arias Bastidas, 2020). El otro tipo de corrosión común es el de tipo localizado que se presenta sobre zonas reducidas y puntuales produciendo, en consecuencia, cavidades que se desarrollan una vez la capa de óxido pasiva se degrada y repercute sobre el hierro presente en el metal haciendo que este actúe como una disolución anódica local en la cual la pérdida del metal crece de forma acelerada debido a la presencia de un ánodo pequeño y un cátodo mayor (Quintero Ortiz et al., 2015).

2. Objetivos

2.1 Objetivo General

Evaluar la sensibilidad y resolución a sistemas de inspección de corrosión para tuberías metálicas utilizadas en el área de transporte de hidrocarburos, a partir de mapeos *C-Scan* con la técnica *Phased Array Ultrasonic Testing (PAUT)*.

2.2 Objetivos Específicos

Seleccionar los parámetros de estudio de *PAUT* que influyan sobre la sensibilidad y resolución para definir las variables de estudio adecuadas para realizar mapeos de corrosión con barridos *C-Scan*.

Evaluar el efecto de las variables de estudio en la estimación de daños ideales mecanizados en un bloque patrón mediante la simulación de mecanismos de daño representativos por corrosión presentados en tuberías de transporte de hidrocarburos.

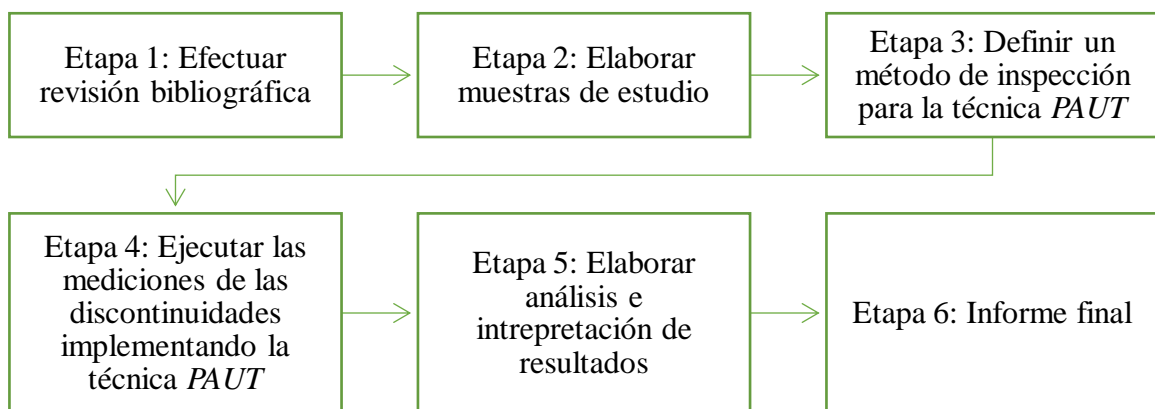
Determinar un procedimiento de configuración del equipo para reducir el porcentaje de variación y aumentar la calidad de los resultados de sensibilidad y resolución en los daños evaluados con base en los resultados obtenidos.

3. Metodología

La Figura 4 muestra la metodología implementada a lo largo de este proyecto, la cual está dividida en seis etapas, algunas de las cuales se subdividen en actividades. A continuación, se proporciona una descripción detallada de cada una de estas etapas.

Figura 4.

Metodología del proyecto.



3.1. Etapa 1: Realizar la revisión bibliográfica

A lo largo de la ejecución del proyecto se implementó la revisión bibliográfica, apoyándose del material disponible, a partir del cual se recabó y estudió información relevante para su desarrollo, por medio de uso de libros, artículos, manuales, normas, bases de datos, entre otros.

Se enfocó en los mecanismos de daño representativos en tuberías de transporte de hidrocarburos y en los parámetros de configuración de la técnica de inspección, la sensibilidad y resolución y la probabilidad de detección de discontinuidades relacionada con la técnica *PAUT*.

Se realizó una revisión de la norma API 571 y otros textos relevantes como el publicado por (Scully, 2018) para comprender los mecanismos de daño que afectan a las tuberías en servicio,

centrándose en los daños por corrosión típicos en la industria petroquímica y de refinación (American Petroleum Institute, 2020). Se seleccionaron tipos de daño representativos considerando su clasificación (localizada o generalizada) y limitando las dimensiones del daño a dos centímetros. Se priorizó la detección temprana, aunque se reconoció que los daños podrían aumentar con el tiempo en servicio. Se clasificaron cualitativamente según su morfología y dificultad de detección en alta, media y baja, con el fin de evaluar la fiabilidad de los resultados obtenidos mediante *PAUT*.

Se consideró la posibilidad y facilidad de mecanizar los daños mediante electroerosión por penetración (*EDM, por sus siglas en inglés*), un proceso de mecanizado de alta precisión que utiliza un arco eléctrico entre un electrodo y una pieza para reproducir la forma del electrodo en la pieza. (Marashi et al., 2017). La selección también consideró que los daños fueran replicables mediante torneado *CNC*, un procedimiento automatizado que sustituye procesos de mecanizado manuales (AMG MetalMecánica, 2023).

Puesto que este trabajo de investigación se centró sobre tuberías implementadas en el transporte de hidrocarburos, a continuación, se presentan los mecanismos de daño principales que pueden afectar dichas piezas. Estos se muestran de forma más detallada en la Tabla 1, donde se brinda información sobre la morfología y algunas recomendaciones sobre las técnicas de inspección adecuadas para su detección, cabe resaltar que para este estudio se ha omitido la inspección visual por considerar en este trabajo solo la corrosión interna, y, al final, se encuentra la descripción de los nombres de cada una de las abreviaciones utilizadas. Seguidamente, (observando la Tabla 2), se presenta un registro fotográfico de los mismos mecanismos de daño mencionados anteriormente. Las dimensiones de dichos daños exhiben un rango de diámetros en el que sea posible encontrarles y ser de interés para su detección de manera oportuna mediante

barridos *C-Scan*, no obstante, pueden tener diámetros fuera de este rango. Los datos analizados fueron obtenidos a partir de la revisión bibliográfica efectuada y fueron tomados como fundamento para definir la dificultad de detección al aplicar *PAUT* en esta investigación.

Tabla 1.

Mecanismos de daño presentes en tuberías del transporte de hidrocarburos. Autor

Mecanismos de daño	Morfología	Dimensiones [cm] y técnicas de inspección	Dificultad para detección
Erosión (Evert D.D. During, 2018)	Pérdida localizada de espesor en forma de hoyos, surcos, barrancos, olas, agujeros o redondeados (tabla 2.a).	1 – 10 PAUT-RT	M
Cavitación (Evert D.D. During, 2018)	Picadura de punta afilada (tabla 2.b).	0.5 – 3 PAUT-RT	A
Grietas de recalentamiento (API, 2011)	Se presenta de manera intergranular y puede romperse o incrustarse (tabla 2.c).	2 – 6 PAUT-MT	A
Oxidación (API, 2011)	Se sufre un adelgazamiento con tendencia esferoidal debido a la oxidación (tabla 2.d).	0.7 – 10 PAUT	M
Corrosión CO2 (Islam et al., 2021)	Se presenta como picaduras por corrosión, puede sufrir perforaciones profundas y ranuras en el área de turbulencia (tabla 2.e).	2– 8 PAUT- RT	M
Fragilidad por hidrógeno (HE) (Evert D.D. During, 2018)	A escala macro el agrietamiento parecerá quebradizo con superficies de fractura visible y escala micro se debe comparar con una fractura sin la presencia de hidrógeno (tabla 2.f).	0.3 – 7 PT-MT- RT- PAUT	M
Corrosión por aminas (API, 2011)	Se presenta una fisuración por corrosión por tensión de aminas (tabla 2.g).	0.6 – 4 PAUT	M
Corrosión por bisulfuro de amonio (API, 2011)	Pérdida general de espesor, altas pérdidas de pared o una corrosión extremadamente localizada (tabla 2.h).	0.1– 2 PAUT-RT	A

Mecanismos de daño	Morfología	Dimensiones [cm] y técnicas de inspección	Dificultad para detección
Corrosión por ácido nafténico (API, 2011)	Se caracteriza por una corrosión localizada, corrosión por picadura o pérdida uniforme del espesor (tabla 2.i).	0.5 – 6 PAUT-RT	M
Corrosión por ácido fluorhídrico (API, 2011)	Se puede presentar agrietamiento y pérdida de espesor (tabla 2.j).	3– 8 PAUT-RT	A
Corrosión por alta temperatura H₂/H₂S (Evert D.D. During, 2018)	Pérdida uniforme de grosor desde el lado del proceso y se acompaña de la formación de una escala de sulfuro de hierro (tabla 2.k).	0.8 – 6 PAUT-RT	M
Corrosión por ácido sulfúrico (API, 2011)	Ocurre un ataque de depósito insuficiente localizado (tabla 2.l).	0.5 – 5 PAUT-RT	M
Metal dusting (Evert D.D. During, 2018)	Se presentan en forma de pequeñas picaduras, en algunas áreas se presentan numerosos hoyos redondeados, adelgazamiento y/o perforaciones de la pared (tabla 2.m).	0.5 – 8 PAUT-RT	M
Corrosión Microbiológicamente Inducida (MIC) (Evert D.D. During, 2018)	Se observa como picaduras localizadas y se caracteriza por hoyos en forma de copa dentro de los hoyos (tabla 2.n).	0.5-5 PAUT-RT	M

*PAUT: Phased Array Ultrasonic Testing *RT: Radiography Testing
*MT: Magnetic Particles Testing *VT: Visual Testing *PT: Penetrating testing
*UT: Ultrasonic Testing.

Nota: Información adaptada de: (During, 2018) y (American Petroleum Institute, 2020).

Otra característica de algunos de los mecanismos mostrados en la Tabla 1 es la posibilidad de ser mecanizados usando *EDM* sobre un bloque patrón, puesto que esta técnica posee la capacidad de obtener formas complejas gracias a sus pequeñas dimensiones asociadas directamente a la forma del electrodo. A partir de este se obtiene la figura que se imprimirá, por

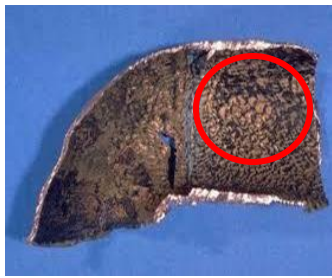
esto, debe ser de fácil mecanizado en un torno; condición que resulta idónea para la toma de datos implementado la técnica *PAUT*. La Tabla 2 incluye información gráfica sobre los mecanismos de daño de forma general, las imágenes son un factor que presenta información relevante sobre la morfología de los daños para diseñar el bloque patrón.

Los mecanismos analizados dentro de la revisión bibliográfica para la selección de los mismos exhibían una relación que se comporta de manera inversa entre sus dimensiones y la dificultad para detectarlas; lo que implica que entre más pequeñas sean las dimensiones del daño más difícil será su detección (Scully, 2018). La resolución al utilizar *PAUT* para detección de pequeñas discontinuidades se encuentra directamente relacionada con la longitud de onda, dependiendo en consecuencia de la frecuencia, y las características del transductor, el tiempo de uso, del haz generado, entre algunas otras variables; donde es imprescindible conocer el efecto producido por cada una de estas y cómo influye sobre el error generado y la máxima sensibilidad obtenida. Con la finalidad de reducir la atenuación del ultrasonido se manejan bajas frecuencias, no obstante, deben alcanzar la frecuencia necesaria para un mínimo de sensibilidad requerido para la detección de defectos establecidos con un tamaño mínimo (Fuquen Sanabria, 2014).

Lo anterior hace necesario conocer o tener la posibilidad de acceder a la configuración para verificar la sensibilidad y resolución de cada sistema a través de la técnica *PAUT*. En la Tabla 2 se presenta la morfología de los diferentes daños de interés para esta investigación, la cual cumple una función base en el diseño de daños ideales con las características representativas requeridas.

Tabla 2.

Representación visual de los mecanismos de daño presentes en tuberías del transporte de hidrocarburos.



A. Erosión. (American Petroleum Institute, 2011)



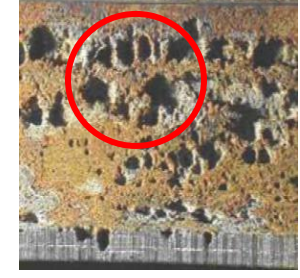
B. Cavitación. (American Petroleum Institute, 2011)



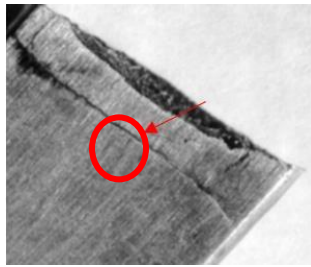
C. Grietas por recalentamiento. (American Petroleum Institute, 2011)



D. Oxidación. (American Petroleum Institute, 2011)



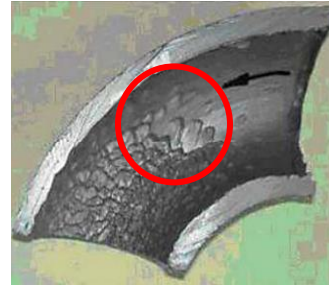
E. Corrosión CO₂. (American Petroleum Institute, 2011).



F. Fragilidad por hidrógeno [HE]. (American Petroleum Institute, 2011)



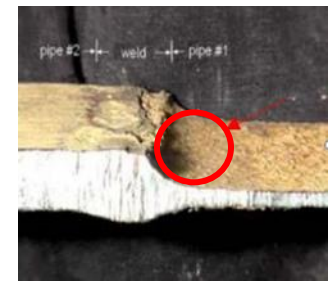
G. Corrosión por aminas. (American Petroleum Institute, 2011)



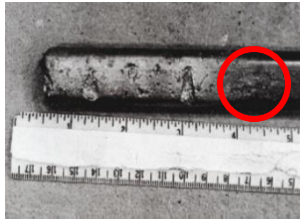
H. Corrosión por bisulfuro de amonio. (American Petroleum Institute, 2011)



I. Corrosión por ácido nafténico. (American Petroleum Institute, 2011).



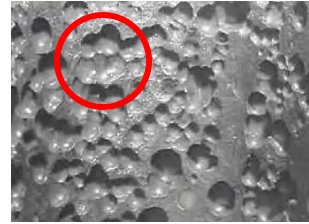
J. Corrosión por ácido fluorhídrico. (American Petroleum Institute, 2011).



K. Corrosión por alta temperatura H₂/H₂S (Fernández, 2011)



L. Corrosión por ácido sulfúrico (Padilla & Guzmán, 2019)



M. *Metal dusting* (Dobis & French, 2004)



N. Corrosión microbiológicamente inducida (MIC).



Ñ. Corrosión acanalada provocada por estancamiento de agua.

Nota: Tomado y adaptado de: (During, 2018) y (American Petroleum Institute, 2020).

Por último, en la Tabla 3 se detallan los códigos y normativas que especifican el empleo de bloques patrón en procesos de calibración y verificación. Estos documentos sirvieron como referencia para establecer los criterios en el diseño propio.

Tabla 3.

Normas utilizadas en el proyecto.

AUTORES	TÍTULO	RESULTADOS
ASME BPVC.V - 2023	Section V Article 4 “Nonmandatory Appendix J” “Nonmandatory Appendix P”	Bloque de calibración básica alternativa. Interpretación de ultrasonido multielemento.
ASME B31.1-2022	“Power Piping”	Criterios de aceptación alternativos para ultrasonido.
ASTM E2700 – 20	“Standard Practice for Contact Ultrasonic Testing of Welds Using Phased Array”	Procedimientos, registro de datos y limitaciones.
ISO 19675:2017	“Non-destructive testing – Ultrasonic testing – Specification for a calibration block for phased array ultrasonic testing (PAUT)”	Especificaciones para diseño bloque de calibración.
ISO 19285:2018	“Non-destructive testing of welds – Phased array ultrasonic testing (PAUT) – Acceptance levels”	Criterio de aceptación y rechazo.

3.2 Etapa 2: Elaborar muestras de estudio

En esta etapa, se describe la ejecución del diseño del bloque patrón, partiendo de la información recopilada en la Etapa 1. Para este fin se llevó a cabo un diseño de experimentos y los detalles se exponen a continuación. Se seleccionaron los mecanismos de daño cumpliendo con los parámetros establecidos inicialmente: Facilidad de mecanizado, dificultad de detección, tipo de corrosión y geometría del daño. Además, se consideró la posibilidad de caracterizar dimensionalmente los daños utilizando el microscopio *Hirox KH-7700* para establecer dimensiones de referencia y calcular la variación basada en los resultados de *PAUT*. En base a lo anterior, los mecanismos de daño elegidos fueron: Erosión, Cavitación y *Metal dusting*.

Se diseñó y fabricó un bloque patrón con discontinuidades que simulaban los mecanismos de daño seleccionados, sobre las cuales se realizaron mediciones dimensionales utilizando la técnica *PAUT* y el equipo mencionado. Se implementó un diseño de experimentos factorial multinivel para evaluar el impacto estadístico de las variables identificadas en el análisis bibliográfico, determinando la cantidad de mediciones necesarias. Se identificaron factores y variables independientes relacionadas con las dimensiones del bloque patrón y la configuración del ultrasonido *PAUT* en el plan de inspección del equipo, formando la base para el diseño experimental. Se consideraron diversas variables en este análisis.

Variables Entrada (1):

Número de elementos, Salto entre elementos, Focalización (mm).

Variables Salida (2):

Diámetro (mm), Espesor (mm).

Se asignaron letras A, B y C para representar los factores, como se detalla en la Tabla 4. En dicha tabla, se especifica, para cada factor, el valor establecido en el plan de inspección para cada escaneo específico a ejecutar y la referencia (REF.) empleada en el análisis estadístico.

Tabla 4.

Factores para el diseño de experimentos. Autor

FACTOR	LETRA	VALORES	REF.	FACTOR	LETRA	VALORES	REF.
Número de elementos	A	4	1	Focalización (mm)	C	1	1
		7	2			5	2
		9	3			10	3
		12	4			14	4
Salto entre elementos	B	1	1	-	-	-	-
		2	2	-	-	-	-
		3	3	-	-	-	-

Nota. Variables con sus respectivas letras, valores y referencia (REF.) utilizados para realizar el diseño de experimentos.

Se llevó a cabo la combinación aleatoria de los tres factores de estudio, A, B y C, junto con sus respectivos valores. Se empleó el software *Statgraphics* para crear un diseño de experimentos factorial de múltiples niveles y definir los escaneos a realizar sobre el bloque diseñado. Cada factor abarca los valores para cada nivel, y cada medición se efectuó con una réplica para obtener resultados estadísticamente más sólidos y el valor promedio de cada discontinuidad. La síntesis del diseño de experimentos se presenta en la Tabla 5, con un total de 96 barridos por defecto.

Tabla 5.

Información sobre el diseño factorial de múltiples niveles.

Factores	3	Réplicas	1
Barridos base	48	Total, de barridos	96

Basándonos en estos resultados, se logró obtener el diseño de experimentos junto con sus respectivas combinaciones, las cuales se llevaron a cabo en el laboratorio en el orden prescrito. En la Tabla 6 se presenta el número total de experimentos, exhibiendo solo las combinaciones de las mediciones de la 1 a la 10 de las 96 en total realizadas. En dicha tabla, se especifica la referencia para cada factor A, B y C, asignada según se indicó previamente en la Tabla 4. Así, la información de la tabla aborda los diez planes de inspección de los 96, que combina los factores según el diseño de experimentos, la información correspondiente a la totalidad de los planes de inspección efectuados se encuentra disponible en el Apéndice A de la pág. 70

Tabla 6.

Barridos del diseño de experimentos.

FACTOR	N° de experimento									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A	4	12	12	9	9	9	4	12	9	7
B	3	3	3	3	1	2	3	1	1	2
C	1	10	14	10	1	10	5	14	5	14

Nota. Ejemplo de los primeros diez barridos con su combinación aleatorizada.

3.2.1 Actividad 1: Realizar el diseño del bloque patrón con las respectivas especificaciones.

Basándonos en la información del diseño de experimentos presentada en las tablas (4, 5 y 6), se llevó a cabo el diseño del bloque patrón. Se definió que el bloque tuviera forma plana tipo placa con un espesor de 15 mm. La elección de este espesor se fundamentó en informes que indican mejores lecturas de sensibilidad y resolución para espesores en un rango entre 12 mm – 25 mm (Olympus NDT, 2007). Para situar las discontinuidades mecanizadas, se consideró la separación entre ellas, priorizando su detección con el escáner *Olympus OmniScan MX2* disponible en el laboratorio, el cual está diseñado para uso industrial. Con este propósito, se estableció una longitud de 204 mm y un ancho de 91 mm. Estas dimensiones aseguraron la capacidad de desplazar el escáner, equipado con el transductor multielemento 5L64-A12, mediante el uso de un *encoder* de cuadratura 12 step/mm sobre la superficie. De esta manera, se aseguró que las discontinuidades mecanizadas estuvieran debidamente cubiertas por el transductor, esto teniendo en cuenta que para un transductor 5L64-A12, su apertura activa es de 38.4 mm. El bloque con sus dimensiones y distribución de las discontinuidades se muestra en el siguiente capítulo.

La morfología y dimensiones de cada discontinuidad se definieron con base en los requisitos de aceptación y rechazo para las discontinuidades en soldaduras y ASME B31.1 mencionados en la Tabla 3. Además, se consideró el proceso de fabricación, teniendo en cuenta factores como el costo, la disponibilidad local y el objetivo de la inspección. Adicionalmente, dado que una de las limitaciones de la técnica *PAUT* es su capacidad para detectar discontinuidades con longitudes de onda menores a 3 mm (asociada a la frecuencia central de la unidad, equivalente a 5 MHz), se buscó que algunas de las discontinuidades tuvieran dimensiones y proximidades mínimas, simulando casos de corrosión prematura, requiriendo así capacidades de sensibilidad y

resolución del equipo. En resumen, el diseño del bloque incluyó múltiples discontinuidades superficiales, con diferentes ubicaciones, diámetros y profundidades en cada caso.

3.2.2 Actividad 2: Fabricar el bloque patrón de acuerdo al diseño.

Basado en el diseño del bloque de estudio, se procedió a mecanizar las discontinuidades, teniendo en cuenta su forma y ubicación según la Tabla 7. Posteriormente se consideró la medida del diámetro de cada una de las discontinuidades respectivamente, según se indica en la misma Tabla 7. En cuanto a la distancia entre las discontinuidades, se seleccionaron con el objetivo de evaluar la resolución del equipo para detectarlos, como se detalla en la Tabla 8. Estos aspectos pueden observarse en la Figura 8 de la sección de resultados en el próximo capítulo.

Discontinuidades inducidas: El procedimiento de electroerosión por penetración implicó la introducción del bloque en una máquina electroerosionadora, donde se utilizó un electrodo de grafito sumergido en un fluido en circulación para cortar el material. En el torneado *CNC*, una máquina dirige una herramienta de corte en movimiento lineal sobre la pieza en rotación para eliminar material y alcanzar el diámetro deseado, resultando el bloque patrón (ver Figura 9 en el capítulo de resultados). Después de mecanizar el bloque, se preparó la superficie usando una grata y lijas número 120, 320 y 600 para suavizarla antes del escaneo con el transductor.

Tamaño de referencia de las discontinuidades: Con el propósito de verificar las dimensiones de las discontinuidades mecanizadas y establecer un valor de referencia para contrastar con las mediciones efectuadas mediante *PAUT*, se llevó a cabo una caracterización dimensional de los diámetros en superficie y profundidades utilizando el microscopio *Hirox KH-7700*. Se llevaron a cabo varios pasos para obtener medidas específicas, que incluyeron localizar cada discontinuidad a una distancia determinada del microscopio, enfocar y capturar imágenes

para usar las herramientas de medición del equipo. Se configuraron 3 cursores (ver Figura 11) y se realizó reconstrucción tridimensional de los diferentes daños (Figura 12), lo que permitió obtener la distancia desde la superficie hasta el inicio de la discontinuidad (profundidad) y el diámetro completo de la misma.

3.3 Etapa 3: Definir un método de inspección para PAUT en el equipo Olympus OmniScan MX2

La configuración del equipo involucró una formación basada en el manual del usuario y documentos afines para comprender y ejecutar adecuadamente sus operaciones. Posteriormente, se llevó a cabo la calibración del Olympus OmniScan MX2, dividiendo esta etapa en dos actividades distintas: la calibración y su posterior verificación.

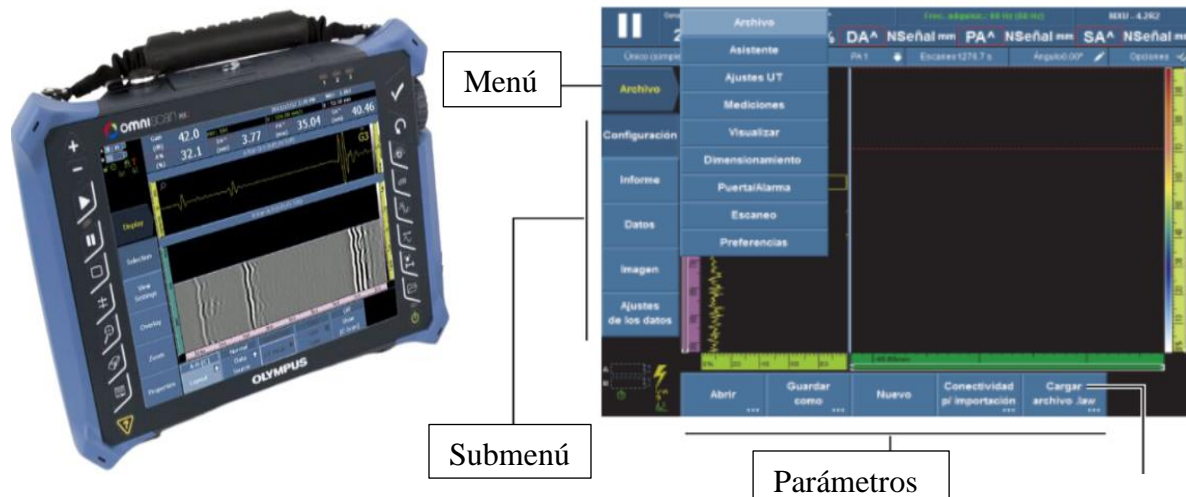
3.3.1 Actividad 1: Realizar la calibración del equipo con diferentes configuraciones.

Como paso inicial, se llevó a cabo una caracterización del equipo, donde se identificaron los accesorios disponibles y se comprendió el uso del software.

El dispositivo *Olympus OmniScan MX2* está equipado con un módulo *PA-TOFD* y las respectivas conexiones para llevar a cabo dichas mediciones. Este operó con el software *MXU 4.2*, y las datas resultantes fueron analizadas mediante el software de asistencia *OmniPC versión 5.13.0*. La Figura 5 proporciona una visualización del equipo, destacando la distribución de botones, menús, submenús y zona de configuración de parámetros. A continuación, se describen los accesorios del equipo, ilustrados en la Figura 6.

Figura 5.

Equipo Olympus OmniScan MX2.



Nota. (A). Equipo Olympus OmniScan MX2. (B). Componentes de la ventana del software OmniScan. Tomado y adaptado de: (Olympus, sf).

Para poder realizar la inspección *PAUT* fue necesario contar con el resto de herramientas del kit *Olympus* como, (ver Figura 6)

Sondas (Palpadores): Incluía sonda *PAUT* de referencia 5L64-A12 con una frecuencia 5 MHz, de 16 y 64 elementos organizados linealmente.

Suelas (Zapatatas): Se implementó una cuña de 0L de referencia SA12-0L.

Adaptador: Se contaba con el cable del codificador, pero con una entrada diferente a la del equipo por lo que fue necesario un adaptador para el codificador.

Codificador (Encoder): Contaba con una mini rueda accionado. Con una resolución de 12 pasos/mm de cuadratura.

Soportes: Para posicionamiento flexible del codificador.

Cables de sonda: Dos cables LEMO®-Microdot® de 2,5 m de largo.

Figura 6.*Kit HST-X04 de Olympus.*

Nota. Kit HST-X04 TOFD de Olympus con cada uno de sus componentes. Tomado y adaptado de: (Olympus, sf).

3.3.2 Actividad 2: Establecer y verificar un método de calibración.

Se procedió a iniciar las calibraciones del equipo siguiendo los requisitos establecidos en la norma ISO 19675:2017 mencionada en la Etapa 1, así como en el manual del equipo, siguiendo una secuencia detallada y específica.

Primero se calibró la velocidad del sonido, implementando un bloque de calibración *IIW*, para esto se seleccionó el tipo de eco y los espesores a usar respectivamente. Seguido de esto, se ubicó la compuerta de modo que esta capture el eco correspondiente al primer espesor, se repitió el procedimiento para el segundo espesor. Se continuó con el retardo zapata utilizando el bloque patrón fabricado, se mantiene el tipo de eco y espesor configurados anteriormente y se posiciona la compuerta sobre el eco asociado al espesor del bloque. Después, para calibrar la sensibilidad, se disminuyen la tolerancia y la ganancia de manera que todos los ecos se encuentren sobre la misma amplitud de referencia.

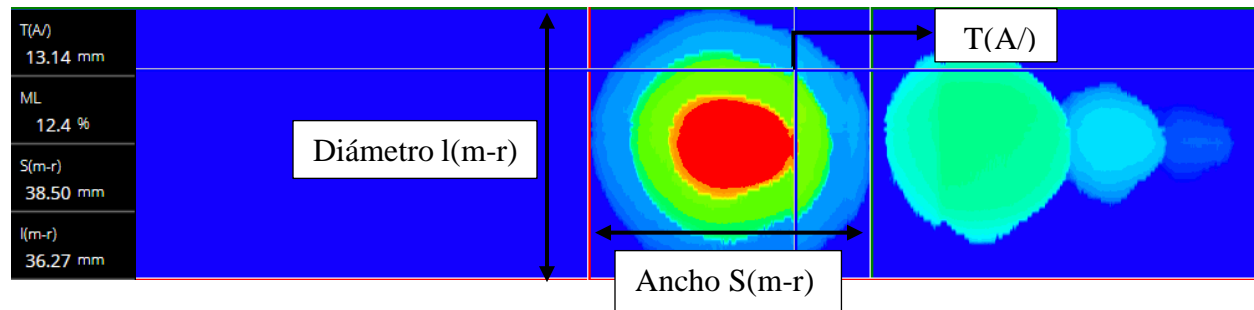
Luego, se prosiguió a calibrar la curva de dimensionamiento *TCG*, seleccionando la amplitud de referencia adecuada y ubicando la compuerta sobre cada uno de los ecos generando puntos que compensan la caída natural de la amplitud de los ecos causada por el aumento de distancia. Finalmente, para calibrar el *encoder I* se configuró la posición inicial y final de escaneo y, posteriormente, se desplazó el codificador sobre la superficie cubriendo la distancia total entre ambos puntos.

Una vez que se completó la calibración del equipo, se determinó que una forma de verificar si la calibración es satisfactoria, es asegurarse de que la velocidad sea próxima a la estándar, y que la *TCG* se encuentre equilibrando, corrigiendo, todas las leyes focales en múltiples profundidades con una configuración de referencia. (American Society for Testing and Materials, 2020). La variación de la velocidad en el material puede encontrarse en un rango máximo, ya sea por encima o por debajo de los 40 m/s y la *TCG* usualmente se encuentra sobre una amplitud de referencia del 80%.

Dimensionamiento de las discontinuidades: Las dimensiones de las discontinuidades se definieron mediante su ancho y profundidad, como se ilustra en la visualización *PAUT C-Scan* de la Figura 7 y se explica detalladamente a continuación. En este caso, la altura, que equivale al diámetro de las discontinuidades, se determina por la diferencia de la distancia vertical entre los ecos positivos y negativos, proporcionada por el equipo como la medición $I(m-r)$. El ancho se establece como la diferencia de la distancia horizontal entre el primer borde del inicio de la discontinuidad y el último borde del final de la discontinuidad, representada en el equipo con la medición $S(m-r)$. La profundidad se representa mediante $T(A/)$ y el porcentaje de pérdida de material en la zona evaluada corresponde a la medición ML . Este proceso de dimensionamiento se detalla en la sección de resultados.

Figura 7.

Ejemplificación de la toma de dimensiones en las discontinuidades trabajadas.

**3.4 Etapa 4: Ejecutar mediciones de las discontinuidades mediante la técnica PAUT**

Una vez completada la calibración del equipo utilizando el bloque fabricado, se procedió a llevar a cabo pruebas de inspección para generar e interpretar las imágenes generadas por el equipo. Tras realizar los barridos correspondientes a cada plan de inspección, se obtienen las mediciones de cada daño utilizando el software *OmniPC versión 5.13.0*. Las mediciones se realizaron ajustando las variables de cada plan de inspección de acuerdo con el diseño de experimentos establecido en la Etapa 2.

Se realizó un análisis estadístico utilizando datos del equipo *OmniScan MX2* para examinar la influencia de las variables en la sensibilidad y resolución de la técnica *PAUT* en la detección y dimensionamiento. Se llevaron a cabo 96 escaneos, incluyendo réplicas, en doce (12) daños, de los cuales se recopilaron datos relacionados con el diámetro de la discontinuidad, tipo y espesor remanente. Se obtuvieron en total 1152 datos, los cuales fueron objeto de análisis estadístico para destacar los factores que influyen en las mediciones, con resultados presentados en la sección correspondiente de los resultados.

4. Resultados

Según la metodología previamente descrita en este capítulo, se exhiben los resultados derivados de la investigación.

4.1 Diseño del bloque de estudio con discontinuidades artificiales

A continuación, se muestra en la Tabla 7 la información sobre las dimensiones del bloque y el esquema correspondiente, detallando la cara específica por la cual se mecanizaron las discontinuidades, así como la distribución y el rango de profundidades obtenidas durante el proceso de mecanizado. En la Tabla 8, se proporcionan los detalles de las medidas destinadas para el diseño de las discontinuidades según el mecanismo de daño representado. En esta tabla, el eje X representa la distancia horizontal, mientras que el eje Y representa la distancia vertical en la que se ubicará la discontinuidad en el bloque.

Tabla 7.

Dimensiones del bloque y las discontinuidades.

DIMENSIONES DEL BLOQUE PATRÓN		Ancho (mm)	Longitud (mm)	Espesor (mm)
		91	204	15
DIMENSIONES DE LAS DISCONTINUIDADES		Diámetro (mm)	Profundidad (mm)	
METAL DUSTING	1	3	2	
	2	3	2	
	3	3	2	
	4	3	2	
	5	3	2	
	6	3	2	
EROSIÓN	1	30	2.50	
	2	20	5	
	3	10	7.50	
CAVITACIÓN	1	5	2	
	2	10	3	
	3	20	4	

Tabla 8.

Medidas para el diseño de las discontinuidades.

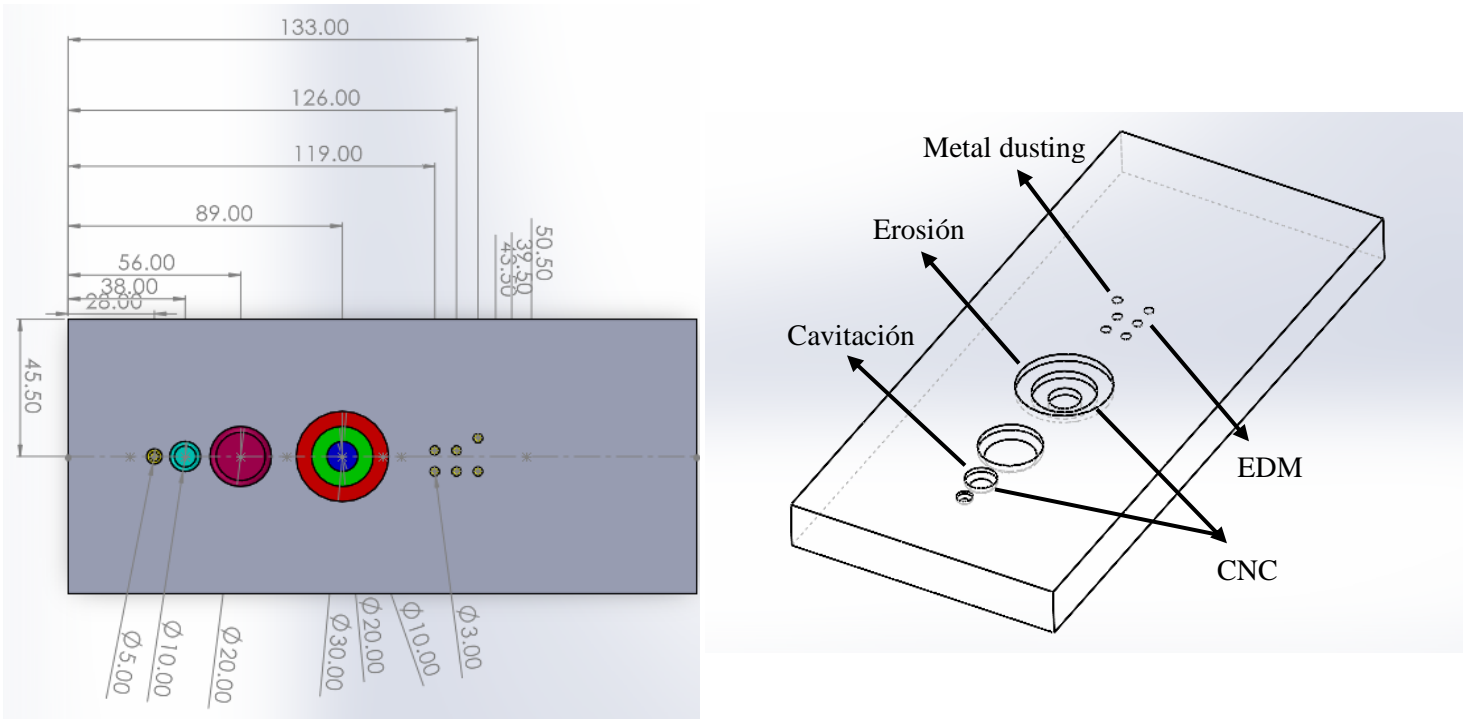
Tipo de discontinuidad	Número de discontinuidades	Eje X (mm)	Eje Y (mm)
METAL DUSTING	1	39.50	133
	2	50.50	133
	3	43.50	126
	4	50.50	126
	5	43.50	119
	6	50.50	119
EROSIÓN	1	45.50	89
	2	45.50	89
	3	45.50	89
CAVITACIÓN	1	45.50	28
	2	45.50	38
	3	45.50	56

Nota. Información sobre las medidas para el diseño de las discontinuidades sobre la superficie del bloque. Se presentan las doce (12) discontinuidades estudiadas según su tipo. *Metal Dusting*: seis (6), Erosión: tres (3) y Cavitación: tres (3).

Con base en las dimensiones establecidas, se llevó a cabo la elaboración del diseño del bloque mediante el software *SolidWorks*, siguiendo las especificaciones detalladas en las tablas mencionadas previamente. Esto se visualiza en el plano de diseño del bloque y el isométrico resultante presentados en la Figura 8. Es importante resaltar que las discontinuidades inducidas fueron diseñadas con el objetivo de evaluar la sensibilidad y resolución. De modo que las de tipo *metal dusting* contaron con dimensiones iniciales o bajas del daño, y separaciones variables, la erosión con cambios abruptos de sección y la cavitación teniendo diámetros variables permitiendo analizar las capacidades de detección del equipo a la hora de realizar una inspección a través de la técnica *PAUT* y, así, consolidar una idea más clara sobre las limitaciones y ventajas de la técnica frente a otros sistemas.

Figura 8.

Diseño del bloque con sus medidas y resultado final del bloque con sus caras.

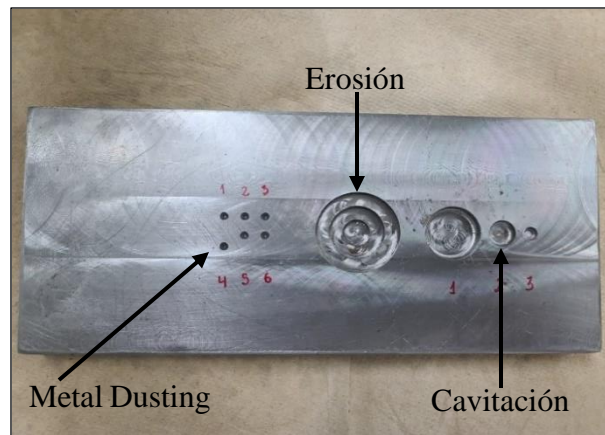


Nota. Discontinuidades incorporadas sobre la superficie del bloque con sus respectivas distancias.

Una vez completado el diseño, se procedió a la fabricación del bloque, para lo cual se utilizó una placa con las dimensiones especificadas en la Tabla 7. Se realizó la preparación superficial, obteniendo el bloque que se exhibe en la Figura 9. Posteriormente, con el bloque ya preparado, se procedió con el mecanizado, dando como resultado las discontinuidades incorporadas que se observan en la misma Figura 9, donde se enumeraron según se muestra en la imagen, proporcionando así una referencia para las mediciones realizadas tanto en el microscopio como en el plan de inspección *PAUT*.

Figura 9.

Bloque de acero diseñado con las discontinuidades mecanizadas.



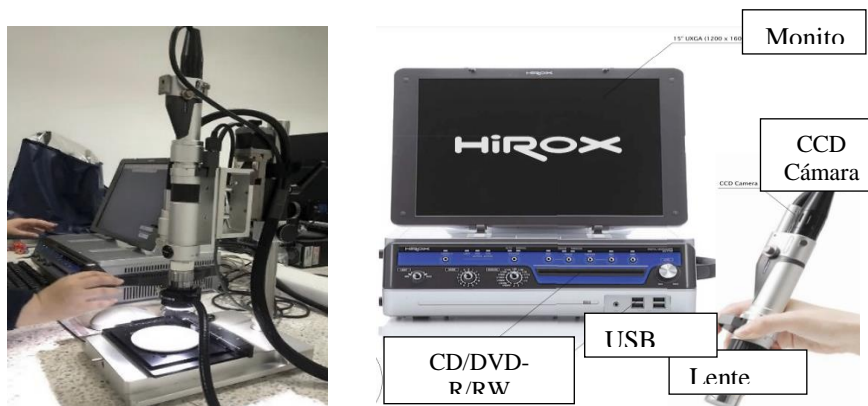
Nota. Bloque producido tras diseño y mecanizado. La numeración mostrada en la figura corresponde al orden en que se analizaron las discontinuidades con el microscopio según el mecanismo de daño simulado.

4.2 Medición de las discontinuidades.

Dado que las discontinuidades pueden experimentar variaciones con respecto a los diámetros planificados, se empleó el microscopio *Hirox KH-7700*, cuya representación visual se muestra en la Figura 10. El propósito de utilizar este instrumento fue obtener las dimensiones de referencia de las discontinuidades mecanizadas.

Figura 10.

Microscopio Hirox KH-7700.



Nota. De lado izquierdo de la figura se observa el microscopio en el laboratorio, mientras que de lado derecho se observa el KH-7700 integrado con un monitor, un disco duro, una unidad de CD/DVD-R/RW y con un software de medición 2D y 3D preinstalado. Tomado y adaptado de: (Hirox, s.f).

El microscopio suministró las dimensiones de diámetro y profundidad en la escala de micrómetros, siendo convertidas a milímetros para coincidir con la escala de medición del equipo *Olympus*. La Tabla 9 exhiben las medidas del diámetro y profundidad correspondientes a cada daño.

Tabla 9.

Mediciones realizadas con el microscopio.

Discontinuidad	Número	Diámetro (mm)	Profundidad (mm)
<i>Metal Dusting</i>	1	3.007	2.485
	2	3.051	2.955
	3	3.082	2.960
	4	3.058	2.156
	5	3.034	2.585
	6	3.098	2.973
Erosión	1	29.407	3.304
	2	19.409	6.956
	3	10.219	9.565
Cavitación	1	19.940	6.138
	2	9.780	5.206
	3	5.229	2.924

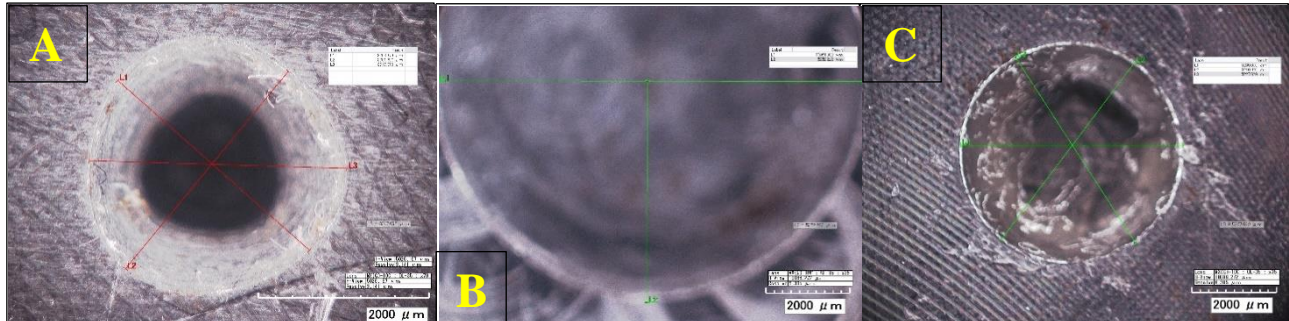
La referencia de la profundidad se toma como la distancia desde el borde de la discontinuidad hasta la pared de la superficie de mecanizado, permitiendo así la comparación con las mediciones de los 96 planes de inspección efectuados mediante *PAUT*.

En la Figura 11 (a, b y c) se muestran las compuertas de medición de la primera discontinuidad de cada tipo de daño, donde se obtuvieron los diámetros respectivos. La Figura 12 presenta una reconstrucción 3D realizada por el microscopio para obtener la profundidad de las discontinuidades, mostrando algunas diferencias respecto a los valores ideales de diseño. Se

tomaron tres medidas de diámetro (L1, L2 y L3) para encontrar un valor promedio (ver Figura 11). Para la profundidad, se ubicó un plano a lo largo de la discontinuidad para cubrirla totalmente y generar el valor correspondiente tal y como observa en la Figura 12.

Figura 11.

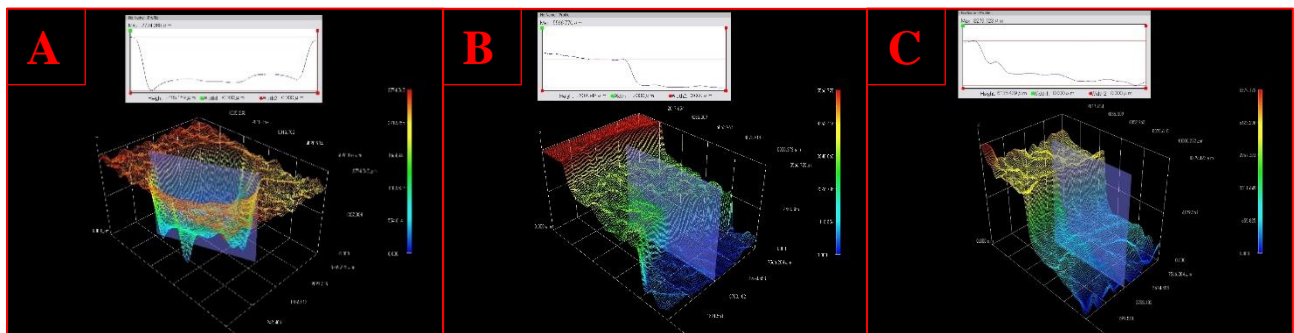
Mediciones del diámetro en el bloque con el microscopio Hirox KH-7700.



Nota. En las imágenes se observan las mediciones del diámetro de las discontinuidades, y la posición de los cursores para tomar las medidas con el microscopio *Hirox KH-7700*. A. Discontinuidad tipo *metal dusting*. B. Discontinuidad tipo erosión. C. Discontinuidad tipo cavitación.

Figura 12.

Reconstrucción 3D y mediciones de profundidad con el microscopio Hirox KH-7700.



Nota. En las imágenes se observan las mediciones de las profundidades de las discontinuidades, y la reconstrucción 3D realizada con el microscopio *Hirox KH-7700*. A. Discontinuidad tipo *metal dusting*. B. Discontinuidad tipo erosión. C. Discontinuidad tipo cavitación.

4.3 Calibración del equipo *Olympus OmniScan MX2* y dimensionamiento de las discontinuidades.

La calibración se realizó implementando un bloque de calibración estandarizado y el bloque patrón fabricado. La velocidad del sonido se calibró utilizando el espesor del bloque *IIW*, seguidamente se calibró el retardo de zapata y la sensibilidad usando el bloque patrón, esto con el fin de tener en consideración las condiciones reales de la rugosidad superficial del bloque fabricado. Luego, se calibró la curva de dimensionamiento *TCG* (*Time Correction Gain*) empleando como reflectores los ecos generados por la pared posterior de la pieza al ubicar el transductor en una zona sana, y finalmente, se calibró el *encoder* utilizando la cara posterior del bloque patrón. La Tabla 10 muestra las variables de referencia necesarias para lograr una calibración completa.

Tabla 10.

Variables de calibración.

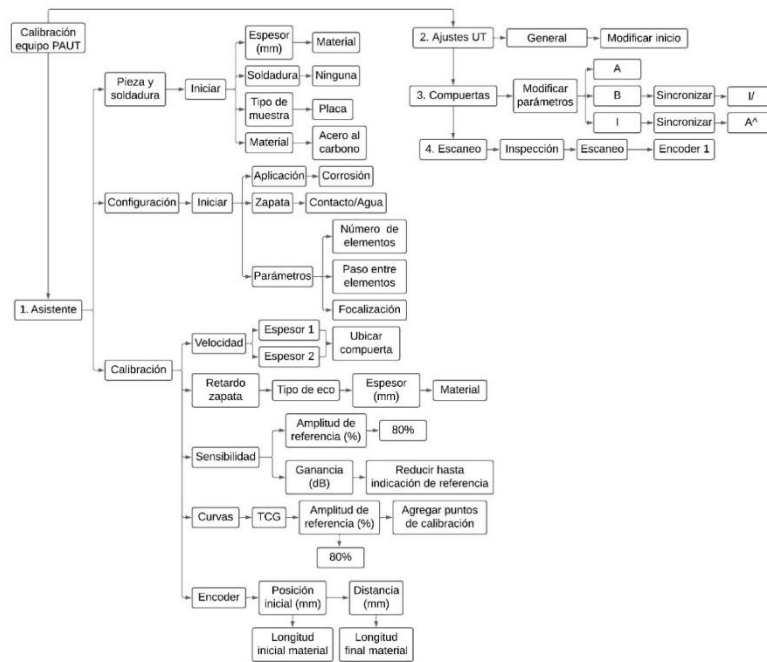
Variables a calibrar	Valores	Unidades
Velocidad	5890.0	m/s
Retardo de zapata	5-7	μm
Sensibilidad	80	% amplitud
TCG	80	% amplitud

Nota. Variables a calibrar en el equipo con sus respectivos valores estándar de acuerdo al alcance del equipo y los elementos predispuestos.

Tras considerar estas variables, se completó la calibración del equipo y se estableció el procedimiento para todos los demás parámetros (Ver Figura 13). Como resultado del estudio, se presenta el diagrama de flujo en la Figura 13, que detalla los pasos necesarios para efectuar una medición con el equipo de *PAUT*, este procedimiento se realizó para todos los planes de inspección.

Figura 13.

Procedimiento seguido para la calibración del equipo en base al bloque diseñado.



Una vez que se ha alcanzado la calibración del equipo se llevó a cabo el procedimiento para dimensionar la discontinuidad. En este contexto, se requirió dividir las operaciones en dos partes: parte 1 y parte 2, las cuales se describen a continuación:

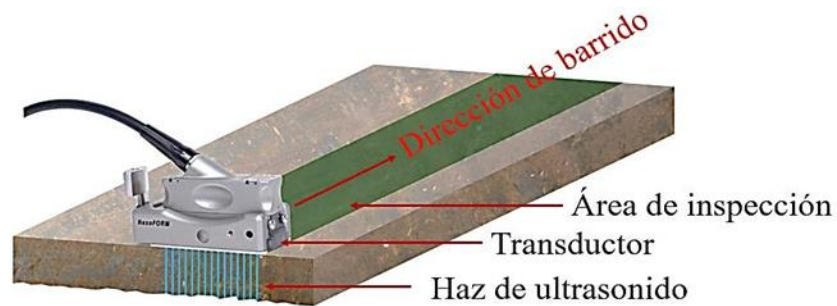
Parte 1: Medición con el equipo calibrado

1. Ajustar parámetros de inspección.
2. Preparar superficie de contacto para que el transductor tenga mejor acople durante el barrido. Pausar el equipo después de realizar el barrido sin mover o separar el escáner.
3. Realizar el barrido asegurándose de cubrir debidamente con el transductor las zonas de interés (discontinuidades). Con el fin de asegurar un mejor acople de la zapata con la superficie del bloque se usó aceite como acoplante
4. Pausar el equipo después de realizar el barrido sin mover o separar el escáner.

La Figura 14 proporciona una representación gráfica de los pasos previamente expuestos.

Figura 14.

Representación del barrido para PAUT parte 1.



Nota. Montaje para el barrido *C-Scan*.

Parte 2: Dimensionamiento de la discontinuidad

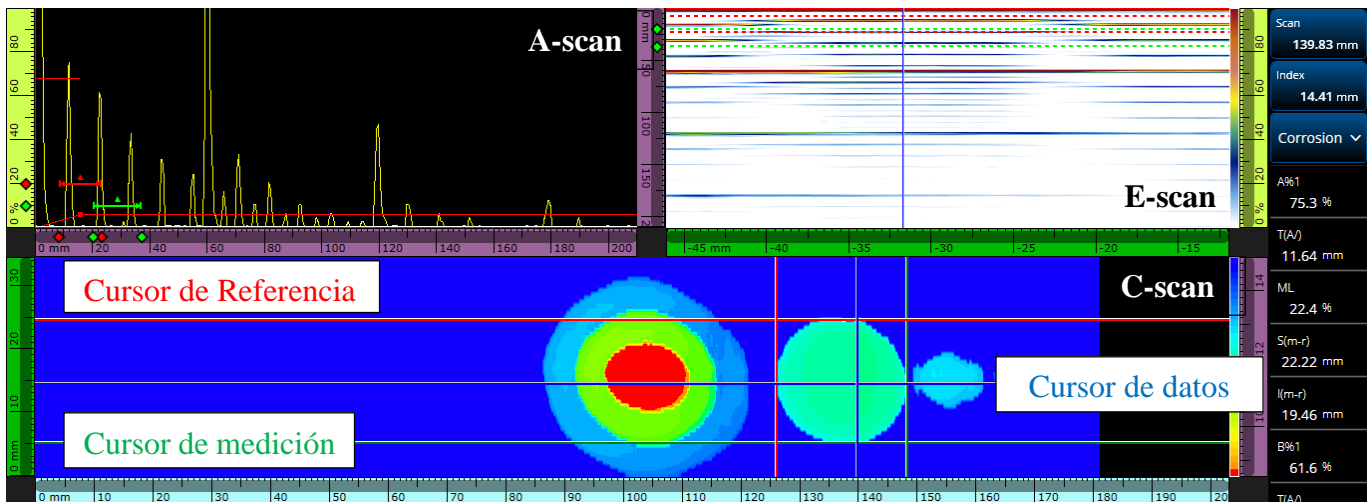
Tras completar la primera parte, continuamos con la ejecución de las operaciones subsiguientes:

1. Observar con detenimiento el *C-Scan*.
2. Ubicar el cursor “Ajustar cursor referencia” (Rojo), sobre el inicio de la zona de la discontinuidad a analizar (cursor vertical – izquierda y cursor horizontal – abajo).
3. Ubicar el cursor “Ajuste cursor medición” (Verde), sobre el final de la zona de la discontinuidad (cursor vertical – derecha y cursor horizontal arriba).
4. El cursor “Ajuste del cursor de datos” se sitúa sobre la zona a inspeccionar y se hace lectura del espesor en el *C-Scan*.

La Figura 15 ilustra el procedimiento anteriormente descrito. Este procedimiento fue realizado para todos los planes de inspección, obteniendo las dimensiones de cada discontinuidad.

Figura 15.

Dimensionamiento de la discontinuidad correspondiente a la parte 2.



4.4 Mediciones de las discontinuidades mediante la técnica PAUT

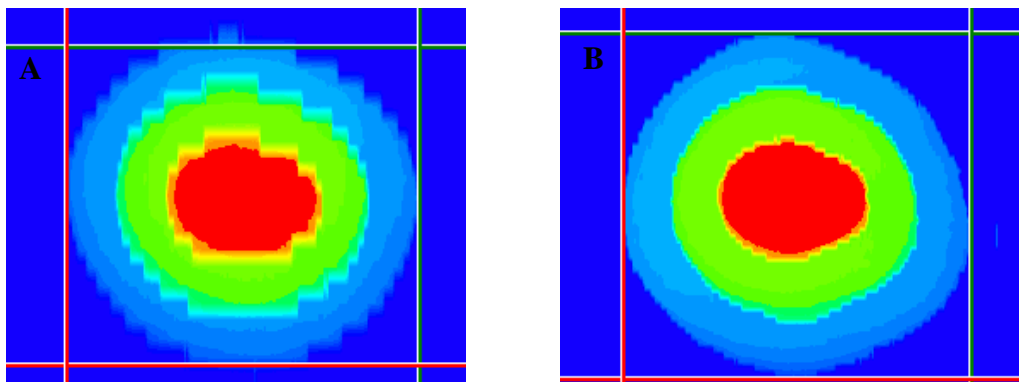
Concluida la fase previa, se procede con el análisis de los datos correspondientes a las discontinuidades presentes en el bloque.

La Figura 16 muestra la discontinuidad tipo erosión con dos planes de inspección para la visualización del *C-Scan*, en la parte A se observa una baja resolución asociada a la configuración del haz ultrasónico, a su vez se puede evidenciar algunas zonas no esperadas y vistas como cambio de la tonalidad del espesor de color azul claro, por ejemplo, donde el espesor varía respecto a las condiciones de diseño. El plan de inspección mostrado en A presenta una buena sensibilidad ya que logra detectar cada uno de los niveles del daño por erosión sin problema, no obstante, se percibe una baja resolución ya que se observan bordes escalonados en lugar de contornos completamente suavizados. En la parte B, a diferencia de la imagen A, el plan de inspección logra generar con mayor resolución el borde de los daños manteniendo algunas zonas en las que se presenta variación en el espesor. De los planes de inspección anteriores se concluyó una buena

sensibilidad en ambos casos, mientras que la resolución era mucho mejor en la imagen B. Las imágenes en la Figura 16 evidencian visualmente el efecto de inspeccionar con dos planes de inspección diferentes, aspecto que se evaluó cuantitativamente en las siguientes secciones. En el Apéndice B se presentan más visualizaciones *C-Scan* que muestran diferentes resultados obtenidos con algunos planes de inspección.

Figura 16.

Discontinuidad tipo erosión detectadas con dos planes de inspección diferentes en el C-Scan.



Nota.

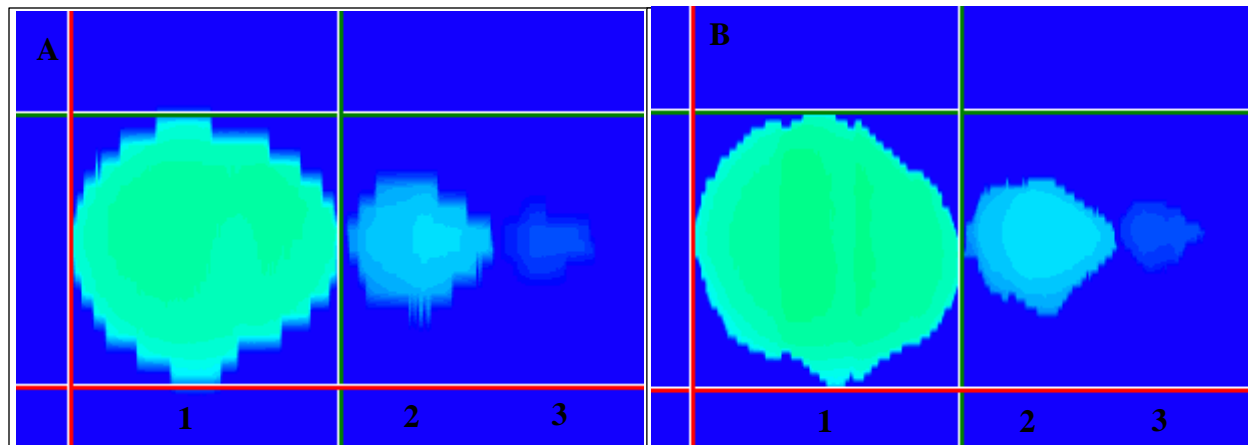
Comparación de dos diferentes configuraciones sobre la discontinuidad tipo erosión en el *C-Scan*. En la figura A se presenta la configuración con Cantidad de elementos: 4, Salto entre elementos: 3, Focalización: 5mm. En la figura B se presenta la configuración Cantidad de elementos: 4, Salto entre elementos: 1, Focalización: 14mm.

En la Figura 17 (a y b) se exhibe la discontinuidad tipo cavitación en ambas imágenes. En comparación con la discontinuidad tipo erosión, esta presenta tres niveles de forma individual y contaba con diámetros y espesores variables. Los planes de inspección utilizados son los mismos del ejemplo de la Figura 16, y como consecuencia, se aprecia el mismo comportamiento en la resolución, sin embargo, se observa que al disminuir el tamaño del daño la resolución obtenida es

menor. Es pertinente anotar que los daños son circulares y en este caso presentan deformaciones en el contorno obtenido, con mayor efecto en los de menor dimensión.

Figura 17.

Discontinuidad tipo cavitación, con planes de inspección diferentes en el C-Scan.



Nota. Comparación de dos diferentes configuraciones de la discontinuidad tipo cavitación en el C-Scan. En la figura se presenta la configuración Cantidad de elementos: 4, Salto entre elementos: 3, Focalización: 5mm. En la figura B la configuración Cantidad de elementos: 4, Salto entre elementos:1, Focalización: 14mm.

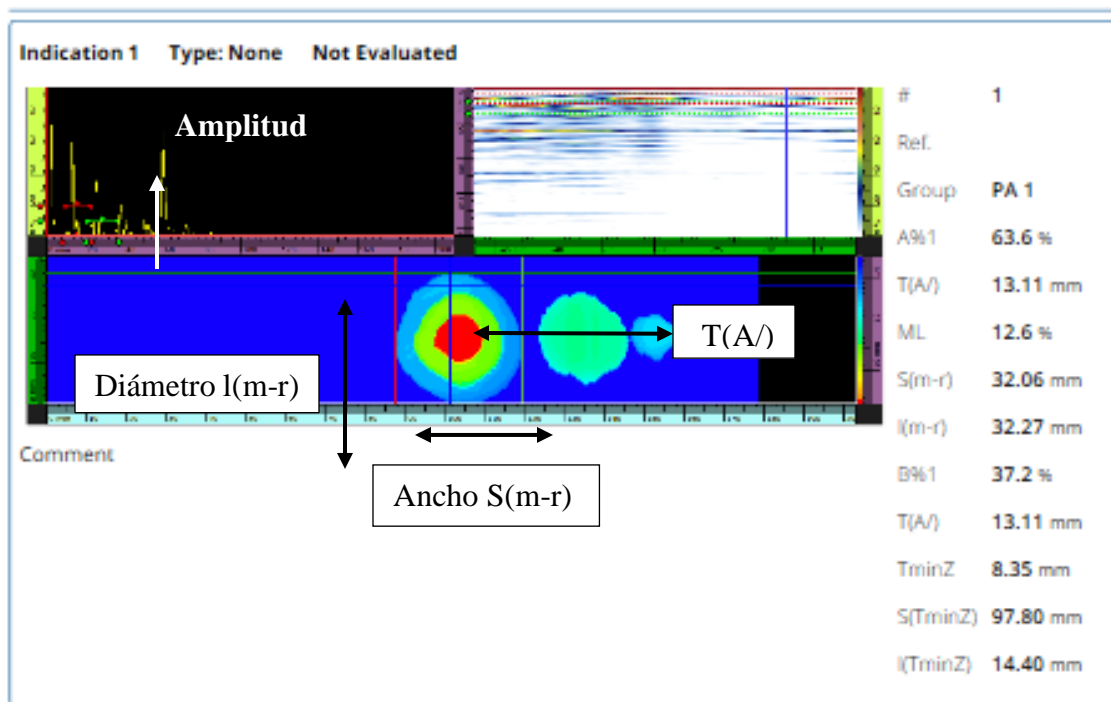
Los datos correspondientes a todos los barridos y las discontinuidades medidas, como se acaba de exponer, fueron extraídos del informe generado por el equipo *Olympus*. Este informe detalla la totalidad del barrido realizado conforme a la configuración establecida en el plan de inspección, proporcionando información sobre la calibración, resolución del *encoder*, y la tabla de defectos con las respectivas mediciones, entre otros datos relevantes. Enfocamos nuestra atención en la información pertinente de la tabla del informe para llevar a cabo el análisis estadístico, centrándonos en los parámetros $l(r-m)$, que representa el diámetro de la discontinuidad, y $T(A/)$, que indica el espesor remanente de la pieza.

Asimismo, para identificar la discontinuidad específica luego de la generación del informe, se consideraron las imágenes resultantes de la inspección, como se ilustra en la Figura 18. En esta

figura, se visualiza tanto el A-Scan como el B-Scan y el C-Scan, los cursores, las amplitudes de referencia, entre otros elementos relevantes.

Figura 18.

Interfaz del A-Scan, E-Scan y C-Scan de la discontinuidad tipo erosión.



Nota. En esta imagen se muestra la interfaz del A-scan y el E-scan, donde se evidencian todos los datos recolectados mediante el barrido realizado.

De este modo se llevó a cabo la recopilación de datos de cada escaneo, organizándolos en la Tabla 11 como se presenta a continuación. A modo de ejemplo, se han incluido los resultados únicamente de los primeros diez planes de inspección con sus configuraciones de cantidad de elementos, salto y focalización respectivas. Para acceder a todos los datos proporcionados en cada plan de inspección, se puede consultar el Apéndice C.

Tabla 11.

Datos suministrados por el Olympus OmniScan mediante la técnica PAUT.

FACTOR	CANTIDAD DE ELEMENTOS	4	7	9	12	4	7	9	12	4	7	
	SALTO ENTRE ELEMENTOS	3	3	3	1	1	1	1	3	3	1	
	FOCALIZACIÓN (MM)	14	14	1	14	1	5	10	14	1	14	
MEDIDAS DE INTERÉS (mm)	EROSIÓN	P1	13.08	13.23	13.08	13.32	13.02	13.20	13.26	13.08	13.05	12.93
		D1	31.40	31.74	32.01	32.46	33.44	31.16	30.91	23.26	33.33	33.06
		P2	10.63	10.75	10.54	10.81	10.51	10.72	10.75	10.60	10.57	10.50
		D2	22.85	21.93	22.19	20.56	23.12	21.67	21.93	20.14	23.37	23.88
		P3	8.17	8.35	8.02	8.29	8.35	8.35	8.20	8.08	8.35	8.35
		D3	10.41	9.49	11.09	9.64	11.81	11.07	10.40	11.56	11.51	11.86
	CAVITACIÓN	P4	11.55	11.55	11.40	11.645	11.49	11.40	11.61	11.55	11.58	11.31
		D4	21.92	21.44	20.32	18.507	22.96	21.82	20.33	17.51	21.48	23.57
		P5	12.63	12.69	12.51	12.645	12.60	12.63	12.78	12.63	12.66	12.57
		D5	10.57	9.00	10.50	8.084	10.81	9.17	9.26	8.15	8.59	11.23
		P6	13.83	13.92	13.62	14.069	13.77	14.07	13.89	13.83	13.95	13.83
		D6	4.51	4.58	5.99	3.120	5.66	2.69	4.16	3.33	3.26	5.85

Nota. En la tabla se muestran los primeros diez barridos realizados, donde se obtienen los datos que se observan. La letra “P” de la tabla representa la profundidad y la letra “D” de la tabla el diámetro de las discontinuidades.

El diseño de experimentos implementado permitió introducir los resultados obtenidos en el software estadístico *Statgraphics* sin necesidad de ser promediados, allí se seleccionaron las medidas de tendencia central más significativas, como la media, desviación estándar y moda de los 48 experimentos aleatorizados incluyendo su réplica. La media representa el promedio de los valores recopilados en el laboratorio para cada discontinuidad seleccionada al azar. En la Tabla 12, se detallan las medidas de tendencia central mencionadas anteriormente, donde “P#” denota la profundidad de la discontinuidad, y cada número asignado se refiere a la discontinuidad correspondiente.

Tabla 12.

Medidas de tendencia central de la profundidad de la discontinuidad.

Variable	Conteo	Media	Error estándar de la media	Desv. Est.	Moda	N para moda
P1	96	13.1550	0.0361	0.1491	13.141; 13.111	5
P2	96	10.6919	0.0438	0.1819	10.595; 10.685	24
P3	96	7.86630	0.2254	1.0649	8.250 11.480;	90
P4	96	11.6365	0.0267	0.1282	11.560; 11.600	14
P5	96	12.7740	0.0397	0.1835	12.662	8
P6	96	13.8869	0.0520	0.2310	13.830; 13.890	8

Nota. Los datos contienen por lo menos cinco valores de moda. Sólo se muestran los cuatro más pequeños.

La información revela la moda y la media como los valores más frecuentes y el promedio de todas las mediciones recopiladas, respectivamente. Para P3 se presenta la desviación estándar más alta y en el caso de P4 se tiene la desviación más baja entre todos los datos analizados.

La Tabla 13 exhibe la letra “D#” en la casilla de variable, indicando el diámetro de la discontinuidad. En ella, se muestran las medidas de tendencia central de las seis discontinuidades.

Tabla 13.

Medidas de tendencia central del diámetro de la discontinuidad.

Variable	Conteo	Media	Error estándar de la media	Desv. Est.	Moda	N para moda
D1	96	30.8222	0.3459	4.4233	11.103; 11.275	1
D2	96	24.2006	0.2365	1.2198	23.850	13
D3	96	13.1613	0.2775	1.2906	12.850	18

D4	96	21.9417	0.2335	1.5436	20.400	14
D5	96	10.9600	0.1359	1.1518	10.202; 10.438; 10.621	1
D6	96	5.87777	0.2653	1.1761	5.4915	2

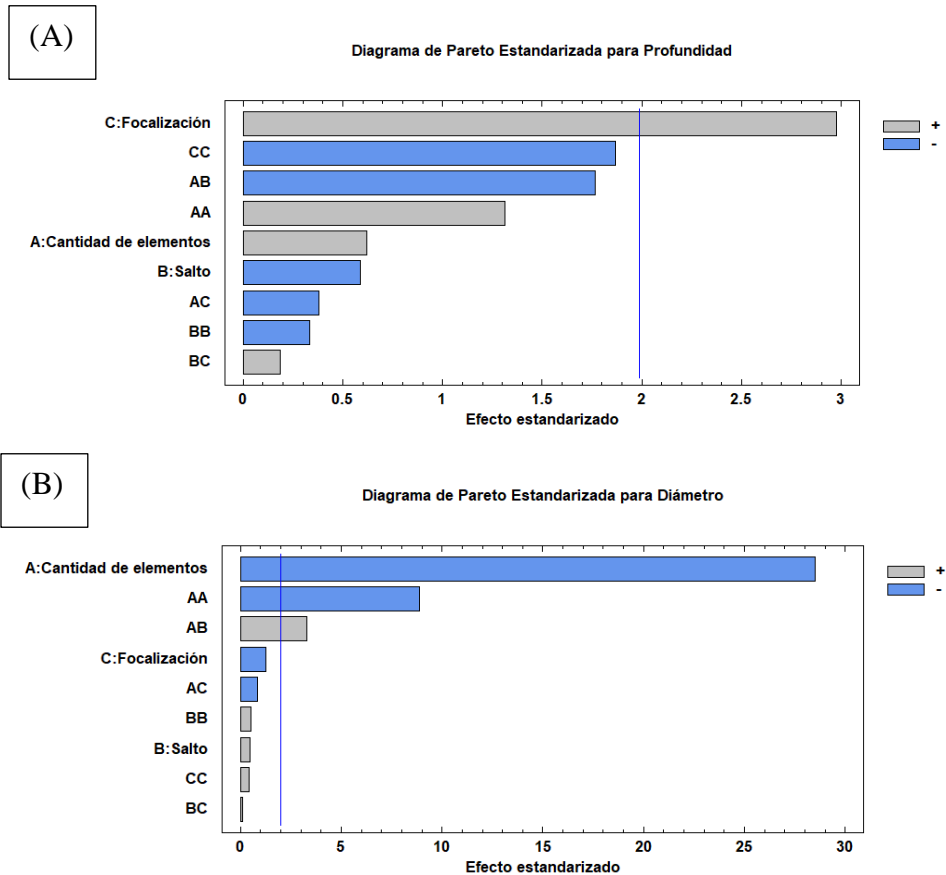
En este caso, D1 exhibe la desviación estándar más alta y D5 presenta la más baja entre los datos recopilados. La moda y la media corresponden a los valores más frecuentes y el promedio de las mediciones efectuadas nuevamente.

Se llevó a cabo un análisis del diseño factorial propuesto en el software mencionado anteriormente para identificar las variables con efecto significativo en la inspección mediante la técnica *PAUT*, utilizando el diagrama de Pareto. Este diagrama clasifica los factores y sus combinaciones según su frecuencia, de mayor a menor. Se aplicó el método de eliminación hacia atrás, utilizando un nivel de significancia de 0.1 para el alfa (α).

En la Figura 19A, Se evidencia que el término Focalización (C) es el único que supera la línea de referencia, resaltando como el factor con mayor efecto estadístico en la medición del primer nivel de la discontinuidad tipo erosión. Por otro lado, en la Figura 19B, los factores que influyen en las mediciones del diámetro son Cantidad de elementos (A), Cantidad de elementos-Cantidad de elementos (AA) y Cantidad de elementos-Salto entre elementos (AB). Se opta por no considerar combinaciones con tres y cuatro niveles, ya que este patrón no se presenta en el resto de las mediciones. El Apéndice D proporciona las demás imágenes generadas.

Figura 19.

Diagrama de Pareto de la profundidad y diámetro del primer nivel de la discontinuidad tipo erosión.



Nota. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados o principales del diseño factorial multinivel predispuesto. (A) Pertenece a la profundidad de la discontinuidad. (B) Pertenece al diámetro de la discontinuidad.

El análisis de Pareto identificó los factores que globalmente afectaron las mediciones del espesor y el diámetro de los daños por erosión y cavitación. Para las mediciones del espesor, la interacción doble Focalización-Focalización (CC) tuvo un efecto negativo, mientras que la focalización (C) tuvo un impacto positivo. En cuanto al diámetro, la interacción doble Número de

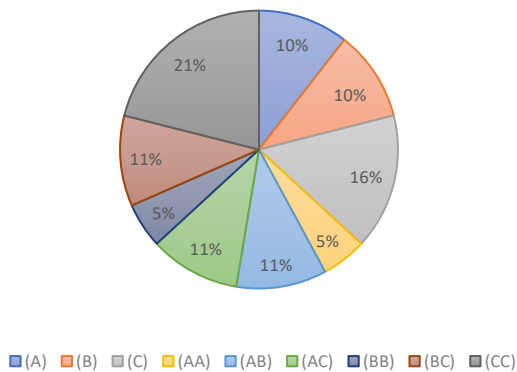
elementos-Salto entre elementos (AB) mostró un efecto positivo, mientras que el Número de elementos (A) tuvo un impacto negativo.

En la Figura 20 se resumen los factores que influyeron sobre las mediciones del espesor y el diámetro medidos. Según lo observado en la tabla y la Figura 19, los factores más relevantes en la medición de la profundidad fueron la Focalización (C) (ver Figura 19A). Asimismo, en relación con el diámetro, se destacan el Número de elementos (A) y sus interacciones dobles de Número de elementos-Número de elementos (AA) y Número de elementos-Salto entre elementos (AB) (Figura 19B).

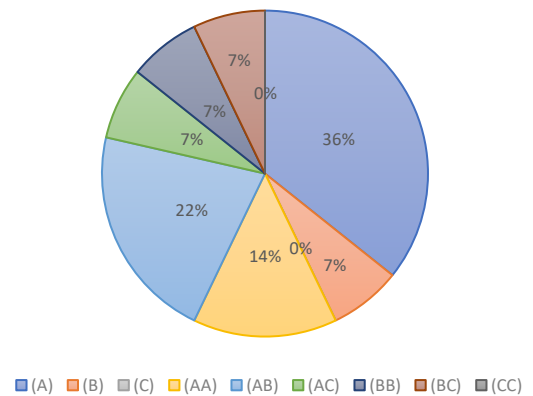
Figura 20.

Resultados del diagrama de Pareto resumido.

Resultados diagrama de Pareto para espesor



Resultados diagrama de Pareto para diámetro



Los gráficos presentados corroboran la información antes mencionada. La Focalización (C) y la interacción doble Focalización-Focalización (CC) fueron los factores de mayor influencia en las desviaciones obtenidas para el espesor y el Número de elementos (A) junto con la interacción doble Número de elementos-Salto entre elementos (AB) tuvieron mayor impacto sobre el diámetro.

Utilizando los datos de la Tabla 11, pero considerando los 48 planes de inspección aleatorizados juntos con réplicas, se llevó a cabo un análisis donde se filtraron los datos que no estuvieran dentro del rango de dimensionamiento seleccionado, que fue de $\pm 15\%$ (Olympus, 2004). Se aplicó un formato condicional para identificar los datos que se encontraban fuera de este rango, se realizó un conteo de dichos datos, y finalmente se evaluó el porcentaje de cada medida para cada discontinuidad en función de los 48 planes de inspección aleatorios y sus réplicas, tomando los 96 datos individualmente en lugar de promediar las 48 tomas iniciales, como se presenta en la Tabla 14.

Tabla 14.

Número de datos por fuera del rango de cada discontinuidad.

Tipo de Discontinuidad	Número	Medida	Datos por Fuera del Rango	%
Erosión	1	PROF.	0	0
		D.	26	27.08
	2	PROF.	96	100
		D.	82	85.42
	3	PROF.	96	100
		D.	80	83.33
Cavitación	4	PROF.	96	100
		D.	24	25
	5	PROF.	96	100
		D.	27	28.12
	6	PROF.	43	44.79
		D.	48	50

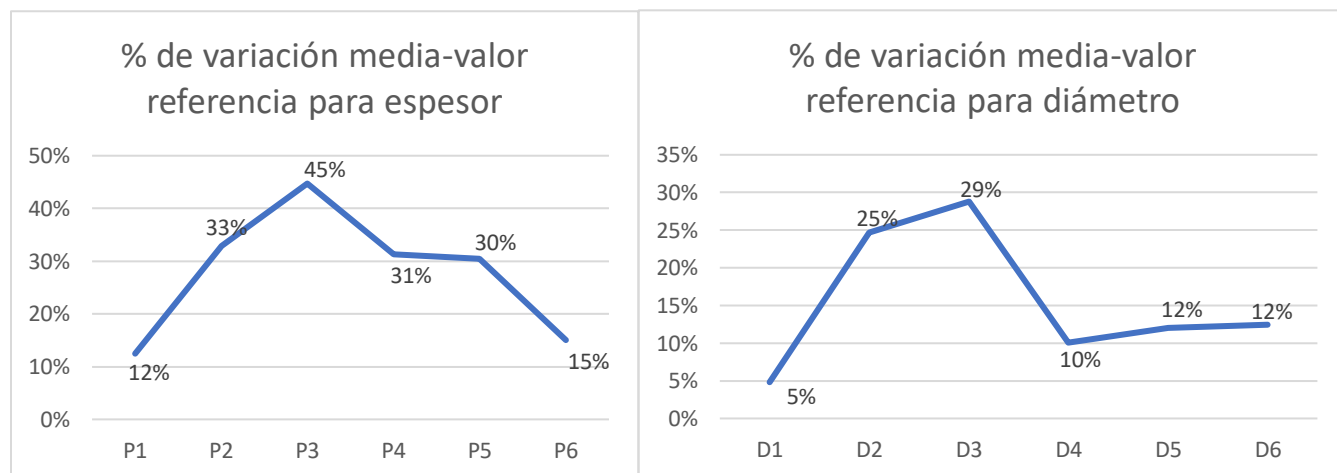
El porcentaje de variación es más alto en las mediciones de espesor de las discontinuidades que en las mediciones de diámetro, con algunas excepciones como el espesor del primer nivel del daño tipo erosión y el diámetro del daño tipo cavitación de menor radio, donde este personaje es menor. Las variaciones más altas en el espesor de las discontinuidades 2, 3, 4 y 5 fueron causadas por limitaciones del equipo al tomar medidas de referencia debido a su morfología. Lo mismo ocurrió al evaluar el diámetro en las discontinuidades 2, 3 y 6, lo que dificultó definir la parte

inicial y final de estas discontinuidades en los escaneos *A-Scan* y *E-Scan*. Los datos fuera de rango indican que las dimensiones del bloque patrón se alinean con los valores críticos del sistema de inspección. Además, se destaca que el daño por *metal dusting* no fue detectado por ninguno de los planes de inspección utilizados, lo que subraya las limitaciones de la técnica y su falta de fiabilidad absoluta.

A continuación, utilizando las medidas derivadas de cada discontinuidad para el espesor y el diámetro, extraídas de la Tabla 12 y la Tabla 13, respectivamente, se ha calculado un porcentaje de variación en comparación con el valor de referencia obtenido con el microscopio, como se detalla en la Tabla 9. El resultado se presenta a continuación en la Figura 21, que muestra el espesor en la figura A y el diámetro en la figura B.

Figura 21.

Porcentaje de variación entre la media y el valor de referencia



A partir de estas gráficas, se puede deducir que el mayor porcentaje de variación se observa en la estimación del espesor de las discontinuidades. En el diámetro se presentó en todos los casos un valor inferior al 30%, mientras que en el espesor se alcanza hasta un 45%. Cabe resaltar que los datos y el porcentaje de variación observado se encuentran influenciados principalmente por el

número de elementos y la profundidad de focalización, es también posible que dicho efecto se deba a la incertidumbre al momento de la toma de datos manual con el microscopio.

Basándonos en los resultados previamente presentados y analizados, se puede concluir que el Número de elementos (A) y la interacción doble Focalización-Focalización (CC) exhiben un efecto negativo sobre las mediciones del diámetro y el espesor respectivamente, mientras que la focalización (C) y la interacción doble Número de elementos-Salto entre elementos (AB) muestran una influencia positiva sobre el porcentaje de variación de las mediciones del espesor y el diámetro de los tipos de daño ideales mecanizados en un bloque de 15mm de espesor. Los efectos positivos y negativos se ven reflejados sobre los resultados aumentando o disminuyendo la sensibilidad y resolución de la técnica. Además, se puede afirmar que la técnica muestra variaciones menores en las medidas de diámetro, pero presenta variaciones mayores en la estimación del espesor, con valores que alcanzan hasta el 44.79% de variación.

Por último, se puede deducir que los factores que ejercen una mayor influencia en la generación de variaciones en las medidas son la cantidad de elementos y la focalización, al igual que la interacción entre la cantidad de elementos y el salto. A pesar de las notables ventajas de la técnica, los resultados experimentales revelaron que la sensibilidad y resolución para la detección de las discontinuidades con las dimensiones, morfología y distribución seleccionada, con valores críticos, si fue limitada, sin poder detectar las discontinuidades tipo *metal dusting* en ninguno de los planes de inspección implementados. Además, el proceso de dimensionamiento y ubicación de discontinuidades aún presenta desafíos al utilizar el equipo y accesorios mencionados al inspeccionar un bloque de 15mm de espesor. La técnica demuestra una gran versatilidad y poder de detección de daños por corrosión respecto a otras técnicas como la medición de espesores o mediciones *B-Scan*, sin embargo, se debe investigar con mayor detalle, específicamente al tratar

de dimensiones de otros tipos de discontinuidades, y deben ser considerados en inspecciones a nivel industrial.

5. Conclusiones

Este proyecto de grado se ha enfocado en la evaluación de la sensibilidad y resolución de la técnica de inspección mediante ultrasonido *Phased Array Ultrasonic Testing (PAUT)* empleando discontinuidades que simulaban los mecanismos de daño seleccionados. Estas discontinuidades fueron mecanizadas superficialmente sobre una placa de acero al carbono con un espesor de 15mm. En una fase inicial, se diseñó y fabricó un bloque que incorporaba estas discontinuidades, permitiendo así la realización de mediciones mediante planes de inspección configurados según el diseño de experimentos factorial multinivel propuesto para este proyecto.

Con base en el diseño de experimentos propuesto, se puede concluir que los factores seleccionados para implementar en los planes de inspección en cada barrido o experimento tienen un efecto estadísticamente significativo en la estimación del diámetro y profundidad a la que se encuentra la discontinuidad. Se observa que los porcentajes de variación con respecto a los datos de referencia llegan hasta un 44.79%. Asimismo, se destaca que la técnica exhibe una sensibilidad y resolución que logra detectar discontinuidades ubicadas tipo erosión y cavitación en condiciones límite a lo largo de la placa. Sin embargo, se debe resaltar que la capacidad de detección se vio limitada debido a la frecuencia del transductor, impidiendo la detección de los daños tipo *metal dusting*. Aun así, se aprecia que la exactitud de las mediciones en algunos planes de inspección presenta variaciones significativas. Este aspecto se considera como una desventaja. No obstante, se reconoce la necesidad de llevar a cabo estudios similares en defectos reales para determinar si el comportamiento observado en este estudio se replica en condiciones reales.

El análisis de Pareto ha identificado los factores que ejercen una influencia significativa, revelando que estos elementos son la causa principal de las variaciones observadas en los resultados de los diversos planes de inspección en términos de dimensionamiento. Asimismo, al examinar las imágenes generadas por el equipo, se percibe el impacto de la cantidad de elementos y la focalización, al igual que la interacción entre la cantidad de elementos y el salto entre elementos, en la inspección cuando los demás factores se mantienen constantes. Se observa que algunos datos se encontraron dentro del rango establecido de $\pm 1\text{mm}$, donde la media de cada conjunto de datos se aproximó al valor de referencia, y la variación se manifestó únicamente en relación con la profundidad, que se salió del rango especificado.

6. Recomendaciones

Se recomienda emplear la técnica *Phased Array Ultrasonic Testing* en materiales con un espesor superior a 15mm y explorar diferentes tipos de discontinuidades para evaluar la precisión en el dimensionamiento. Asimismo, se sugiere emplear transductores de mayor frecuencia, lo que permitiría examinar discontinuidades con longitudes de onda más cortas que las consideradas en este estudio.

Referencias Bibliográficas

- Minitab, LLC. All rights Reserved. (2023). Obtenido de Seleccionar las gráficas que se mostrarán para analizar Diseño factorial : <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/21/help-and-how-to/statistical-modeling/doe/how-to/factorial/analyze-factor>
- American Petroleum Institute. (2020). *Damage Mechanisms Affecting Fixed Equipment in the Refining, Petrochemical & Petroleum Industries*.
- AMG MetalMecánica. (24 de Enero de 2023). *¿Qué es el mecanizado CNC? Aplicación y ventajas*. Recuperado el 05 de Noviembre de 2023, de AMG: <https://www.amgmetalmecanica.com/mecanizado-cnc-que-es/>
- Arias Bastidas, A. (2020). *Estudio de las metodologías de inspección, control y monitoreo de la corrosión interna en el proceso de transporte de gas natural*.
- ASNT. (2012). *The NDT Technician*, 11(3).
- ASTM INTERNATIONAL. (2023). Standard Terminology for Nondestructive Examinations. *ASTM E1316*.
- BIRRING, A. S. (2020). *NDTnet*. Obtenido de TOFD Principle, Limitations, Calibration and Inspection : <https://www.ndt.net/?id=25350>
- Carillo, M. (2021).
- Carrillo, M., & Galán, M. (2021). *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*. Bucaramanga.
- Decodifica Imágenes Enviadas desde la ISS. (s.f.). *Longitud de Onda y Frecuencia*. Obtenido de http://esero.es/practicas-en-abierto/decodifica-imagenes-iss/longitud_de_onda_y_frecuencia.html
- Emilio, G. P. (27 de Diciembre de 2019). *Ingenieros Especialistas Ensayos No Destructivos*. Obtenido de <http://www.ingenierosespecialistas.com/2019/12/errores-comunes-con-algunos-conceptos.html>
- Ferrer-Dalmau, R. (29 de Julio de 2017). *Interempresas*. Obtenido de Automoción (fabricación): [https://www.interempresas.net/Sector-Automocion/Articulos/252588-Ensayos-no-Destructivos-\(END\)-Que-son.html](https://www.interempresas.net/Sector-Automocion/Articulos/252588-Ensayos-no-Destructivos-(END)-Que-son.html)
- Ferrer-Dalmau, R. (29 de Julio de 2019). *Ensayos no Destructivos (END): ¿Qué son?* Recuperado el 13 de Octubre de 2023, de Interempresas: [https://www.interempresas.net/Sector-Automocion/Articulos/252588-Ensayos-no-Destructivos-\(END\)-Que-son.html](https://www.interempresas.net/Sector-Automocion/Articulos/252588-Ensayos-no-Destructivos-(END)-Que-son.html)

- Fuquen Sanabria, O. M. (2014). Metodología para la inspección de soldadura de aceros austeníticos mediante ultrasonido (técnica) Phased Array. *Revista Universidad Libre Ingenierías*.
- Guzman, P. E. (2018). *ULTRASONIDO PHASED ARRAY - PAUT*. Recuperado el 11 de Octubre de 2023, de Ingenieros Especialistas:
<https://www.ingenierosespecialistas.com/2018/11/ultrasonic-phased-array-paut.html>
- Hirox. (s.f.). *3D Imaging Solutions*. Obtenido de KH-7700 Digital Microscope: <https://hirox-europe.com/wp-content/uploads/2019/09/Hirox-KH-7700-catalog.pdf>
- Ims Olympus. (s.f.). *Escáner HST-X04*. Obtenido de <https://www.olympus-ims.com/es/scanners/hst-x04/>
- Ims Olympus. (s.f.). *Evident Olympus*. Obtenido de <https://www.olympus-ims.com/es/applications/defect-sizing-pipe-welds/>
- Intertek. (s.f.). *Ensayos de ultrasonidos por TOFD (Time of flight diffraction)*. Obtenido de <https://www.intertek.es/ensayos-no-destructivos/ultrasonidos/tofd-time-of-flight-diffraction/>
- JIREH INDUSTRIES. (2023). *JIREH INSPECTION ROBOTICS*. Obtenido de <https://www.jireh.com/products/encoder-adapter/>
- Keyence. (2023). *Keyence*. Obtenido de <https://www.keyence.com.mx/ss/products/measure-sys/measurement-selection/environment/calibration.jsp#:~:text=La%20calibraci%C3%B3n%20significa%20Utilizar%20un,con%20un%20est%C3%A1ndar%20de%20medici%C3%B3n.>
- Maquinas y Herramientas. (2017). *¿Qué es un encoder, cuáles son sus tipos y para qué sirven?* Recuperado el 10 de Octubre de 2023, de <https://www.demaquinasyherramientas.com/mecanizado/encoder-tipos>
- Marashi, H., Sarhan, A., Maher, I., & Sayuti, M. (2017). 1.7 Techniques to Improve EDM Capabilities: A Review. *Elsevier*.
- Medium. (8 de Mayo de 2023). *Medium*. Obtenido de NDT vs. QA/QC: Understanding the Differences and Similarities: <https://medium.com/@manchesterengineerscentre/ndt-vs-qa-qc-understanding-the-differences-and-similarities-4cf60c11d3>
- Mobius Institute. (2022). *DICCIONARIO DE ULTRASONIDO MULTIELEMENTO*. Recuperado el 10 de Octubre de 2023, de Mobius Institute:
<https://www.mobiusinstitute.com/diccionario-de-ultrasonido/>
- Modern Machine Shop México. (14 de Julio de 2022). *Modern Machine Shop México*. Obtenido de Electroerosionadoras: <https://www.mms-mexico.com/articulos/electroerosionadoras-que-es-el-mecanizado-por-descarga-electrica>
- Non Destructive Testing* . (2022). Recuperado el 16 de Octubre de 2023, de Ultrasonic Testing:
[http://www.wermac.org/others/ndt ut.html](http://www.wermac.org/others/ndt_ut.html).

Non Destructive Testing – Ultrasonic Testing. (2022).

Olympus. (Julio de 2004). *Olympus*. Obtenido de EVIDENT: <https://www.olympus-ims.com/es/applications/defect-sizing-pipe-welds/>

Olympus. (2022).

Olympus Corporation. (2023). *Aplicaciones prácticas de los ensayos Phased Array*. Recuperado el 10 de Octubre de 2023, de EVIDENT: <https://www.olympus-ims.com/es/ndt-tutorials/intro/advantages/>

Olympus Corporation. (2023). *Códigos de inspección*. Recuperado el 13 de Octubre de 2023, de EVIDENT: <https://www.olympus-ims.com/es/ndt-tutorials/flaw-detection/inspection-codes/>

Olympus Corporation. (sf). *Breve reseña histórica de los ensayos por ultrasonido multielemento (Phased Array)*. Recuperado el 14 de Octubre de 2023, de EVIDENT: <https://www.olympus-ims.com/es/ndt-tutorials/intro/breif-history/>

Olympus Corporation. (sf). *Datos Escaneo Phased Array*. Recuperado el 17 de Octubre de 2023, de EVIDENT: <https://www.olympus-ims.com/es/ndt-tutorials/instrumentation/phased-array-scans/>

Olympus Corporation. (sf). *Glosario de ultrasonido multielemento (Phased Array)*. Recuperado el 10 de Octubre de 2023, de EVIDENT: <https://www.olympus-ims.com/es/ndt-tutorials/phased-array/glossary/>

Olympus. (sf). *Olympus*.

Paulina, J. G., & Edwin, R. (sf). *Zion NDT*. Obtenido de <https://zion-ndt.mx/que-es-un-transductor-6-tipos-y-como-seleccionar/>

Planes, E. F. (4 de Octubre de 2016). *Planes*. Obtenido de <https://ferrospanes.com/que-es-mecanizado/>

Quintero Ortiz, L. A., Arciniegas Villamizar, J. R., Jiménez Romero, M. C., & Vallen Vargas, A. Y. (2015). Efecto en las propiedades mecánicas de daños superficiales generados en tubería compuesta flexible para transporte de hidrocarburos. *Revista de Ingeniería Universidad de los Andes*.

Rimoldi, C., & Mundo, L. M. (2020). Ensayos no destructivos. *Revista Ensayos No Destructivos*, 1, 41.

Rodríguez. (2012).

Salazar-Jiménez, J. A. (Julio-Septiembre de 2015). Introducción al fenómeno de la corrosión: tipos, factores que influyen y control para la protección de materiales (Nota técnica). *Tecnología en Marcha*, 28(3), 127-136.

- Sampath, S., Dhayalan, R., Kumar, A., Kishore, N., & Sohn, H. (2021). Evaluation of material degradation using phased array ultrasonic testing technique with full matrix capture. *Engineering Failure Analysis, 120*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.105118>
- Santos De La Cruz, E., Cancino Vera, N., Yenque Dedios, J., Ramírez Morales, D., & Palomino Pérez, M. (2014). EL ULTRASONIDO Y SU APLICACIÓN. *Industrial Data, 8*(1), 25. doi:<https://doi.org/10.15381/idata.v8i1.6153>
- Schmerr Jr, L. (2004). *NONDESTRUCTIVE TESTING / Ultrasonic*. Elsevier.
- Scully, J. (2018). Corrosion atlas : E. D. D. During, Elsevier, P.O. Box 330, 1000 AH Amsterdam, 442pp., loose-leaf pages in 2 vols, Dfl 995. *Elsevier*. doi:[https://doi.org/10.1016/0010-938X\(93\)90267-K](https://doi.org/10.1016/0010-938X(93)90267-K)
- The American Society of Mechanical Engineers. (2023). *ASME BPVC.V-2023*. New York.
- Thompson, R., & Begum, S. (2017). *NDT Techniques: Ultrasonic*. Elsevier. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.02684-9>
- Vanaei, H., Eslami, A., & Egbewande, A. (2017). A review on pipeline corrosion, in-line inspection (ILI) and corrosion growth rate models. *Elsevier*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2016.11.007>
- Young, D. (2010). 1.12 - Carburization and Metal Dusting. *Shreir's Corrosion - Elsevier*.

Apéndices

Apéndice A. Diseño de experimentos aleatorizado.

El diseño completo de experimentos factorial multinivel que dio por resultado el *Software Statgraphics* que se presenta a continuación, donde se indica la referencia para cada factor A, B y C según la Tabla 4 mencionada en la pág. 32

Tabla 15.

Diseño de experimentos aleatorizado completo.

Corrida	Blq	A	B	C	Corrida	Blq	A	B	C
1	1	4	3	1	49	1	7	1	14
2	1	12	3	10	50	1	9	1	14
3	1	12	3	14	51	1	9	2	14
4	1	9	3	10	52	1	4	1	1
5	1	9	1	1	53	1	4	2	5
6	1	9	2	10	54	1	12	2	10
7	1	4	3	5	55	1	4	2	1
8	1	12	1	14	56	1	9	2	10
9	1	9	1	5	57	1	12	2	14
10	1	7	2	14	58	1	7	2	14
11	1	4	2	14	59	1	9	3	10
12	1	9	1	14	60	1	9	3	5
13	1	12	2	10	61	1	12	2	1
14	1	9	3	5	62	1	4	1	14
15	1	4	2	10	63	1	4	2	10
16	1	7	2	1	64	1	4	3	14
17	1	7	3	10	65	1	7	3	5
18	1	12	1	5	66	1	9	1	1
19	1	7	1	1	67	1	7	2	1
20	1	12	2	14	68	1	12	1	5
21	1	4	3	14	69	1	7	1	10
22	1	7	1	10	70	1	9	3	1
23	1	4	2	1	71	1	7	1	1
24	1	12	3	1	72	1	9	2	1
25	1	9	3	1	73	1	12	2	5
26	1	9	3	14	74	1	4	3	5
27	1	4	1	14	75	1	9	2	5
28	1	12	3	5	76	1	7	3	14
29	1	7	3	1	77	1	12	3	10
30	1	4	1	1	78	1	9	1	10
31	1	7	3	5	79	1	12	1	14

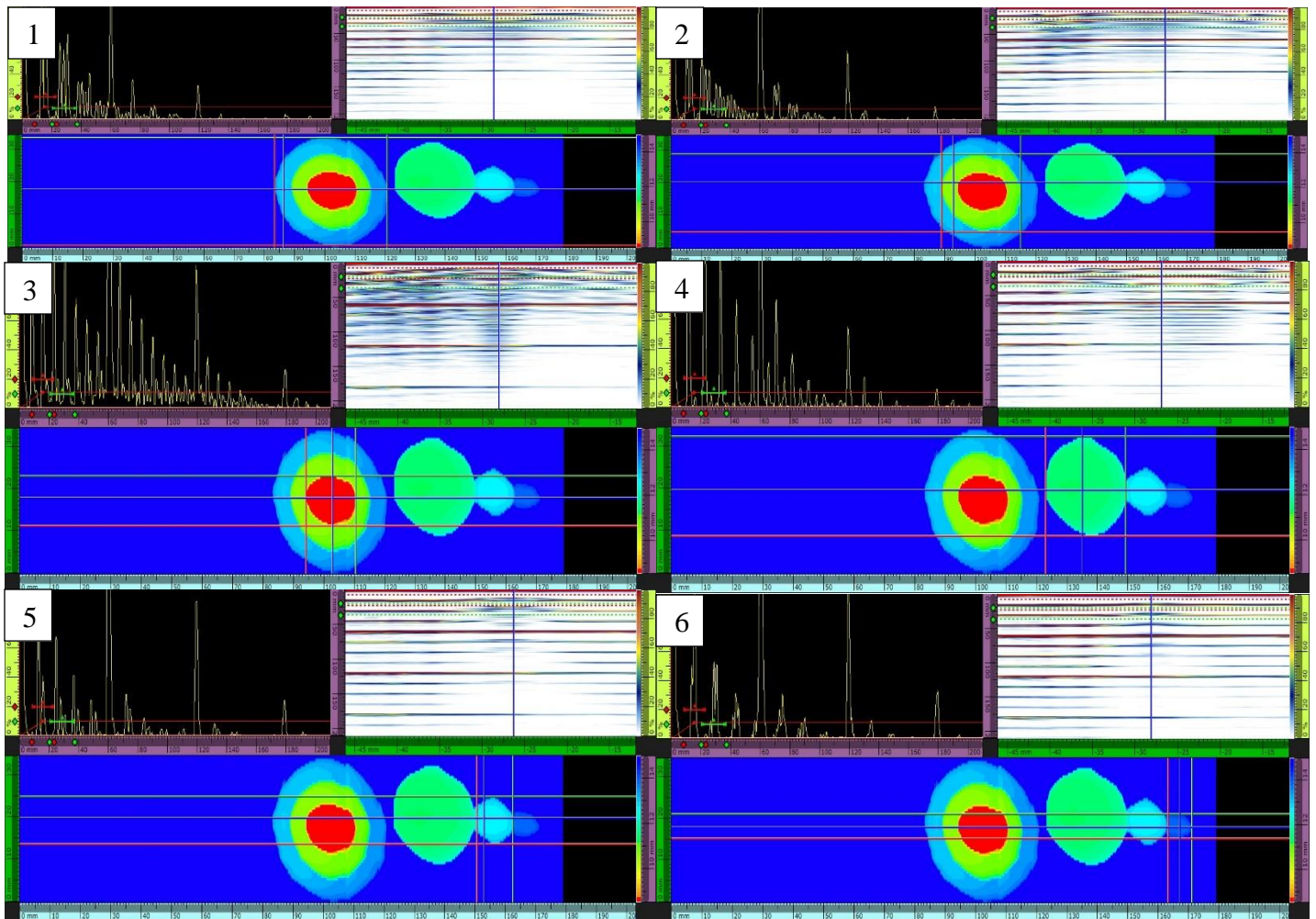
32	1	12	2	5	80	1	4	1	5
33	1	7	1	14	81	1	12	3	14
34	1	7	2	10	82	1	12	1	10
35	1	12	1	1	83	1	9	1	5
36	1	9	1	10	84	1	7	3	10
37	1	7	2	5	85	1	4	1	10
38	1	4	2	5	86	1	7	1	5
39	1	9	2	14	87	1	7	2	5
40	1	7	1	5	88	1	12	3	1
41	1	12	2	1	89	1	12	3	5
42	1	9	2	5	90	1	12	1	1
43	1	4	1	10	91	1	4	2	14
44	1	4	1	5	92	1	9	3	14
45	1	12	1	10	93	1	4	3	10
46	1	9	2	1	94	1	7	2	10
47	1	4	3	10	95	1	4	3	1
48	1	7	3	14	96	1	7	3	1

Apéndice B. Imágenes de la Interfaz del OmniScan.

Para cada configuración del plan de inspección se presenta una variación en cuanto al contraste, ganancia y la capacidad para dimensionar las discontinuidades. En las siguientes figuras se observa la inspección y dimensionamiento de las siete discontinuidades del bloque, cada imagen esta enumerada con el número de la discontinuidad al que corresponde.

Figura 22.

Imágenes de la inspección para cada discontinuidad focalización 14mm.

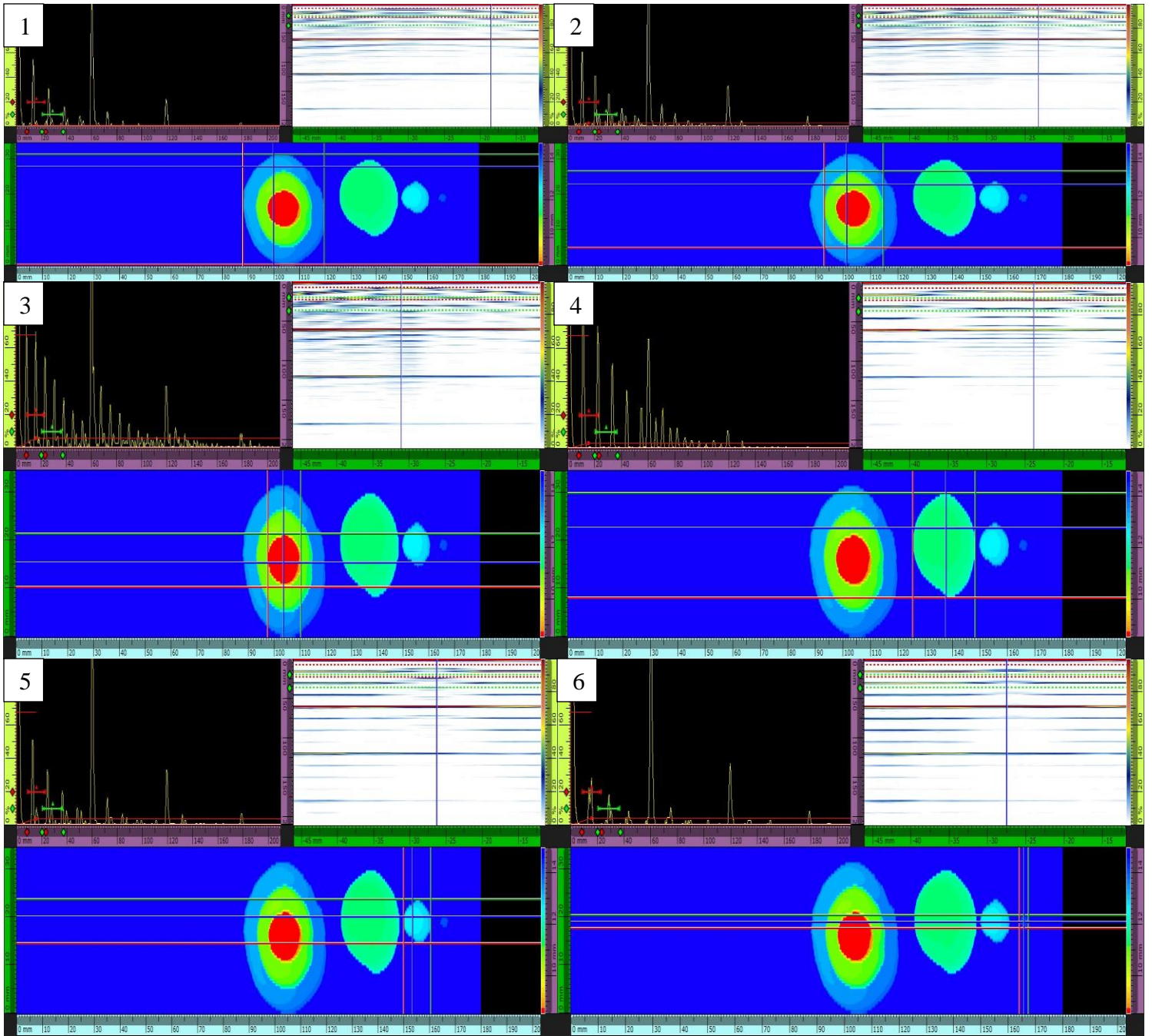


Nota. La configuración presentada para las imágenes anteriormente mencionadas es de

Cantidad de elementos:7, Salto entre elementos: 1, Focalización: 14mm.

Figura 23.

Imágenes de la inspección para cada discontinuidad Focalización 5mm.



Nota. La configuración presentada para las imágenes anteriormente mencionadas es de Cantidad de elementos: 7, Salto entre elementos: 1, Focalización: 5mm.

Apéndice C. Datos recolectados de cada barrido realizado.

Los datos recolectados mediante la técnica PAUT fueron la profundidad y el diámetro de cada discontinuidad, en la siguiente tabla se puede observar los datos generados para cada plan de inspección propuesto, los datos señalados en rojo representan el filtro de $\pm 15\%$, donde estos se encuentran bajo el rango propuesto.

Tabla 16.

Datos recolectados del OmniScan mediante PAUT.

Cantidad de Elementos	Salto entre elementos	Focalización (mm)	P1	D1	P2	D2	P3	D3	P4	D4	P5	D5	P6	D6
			4	3	1	13.05	33.35	10.57	23.77	8.35	11.10	11.58	21.04	12.66
12	3	10	13.11	30.24	10.63	23.66	8.14	14.73	11.49	20.26	12.60	12.75	13.86	7.381
12	3	14	10.59	29.76	10.60	23.08	8.08	13.80	11.55	20.11	12.63	11.47	13.83	6.709
9	3	10	13.17	32.66	10.66	24.57	8.14	12.98	11.52	20.82	12.63	10.73	13.71	5.898
9	1	1	12.99	32.98	10.54	24.39	8.08	13.03	11.55	21.21	12.66	10.89	13.83	5.964
9	2	10	13.32	29.68	10.81	22.86	8.29	13.35	11.64	20.82	12.66	11.28	13.92	6.319
4	3	5	13.26	33.19	10.75	24.15	8.35	11.60	11.85	22.80	12.90	9.75	14.10	4.693
12	1	14	13.32	27.93	10.81	21.99	8.29	13.61	11.64	20.37	11.64	11.46	14.07	6.654
9	1	5	13.23	31.66	10.72	22.81	8.17	13.09	11.61	19.96	12.69	10.92	13.89	5.968
7	2	14	12.90	35.21	10.36	25.63	7.90	12.53	11.40	22.07	12.45	10.50	13.50	5.491
4	2	14	13.08	35.43	10.57	25.06	8.35	11.12	11.52	24.03	12.63	9.55	13.77	4.056
9	1	14	13.20	30.46	10.72	23.13	8.26	13.14	11.70	19.80	12.81	11.14	14.01	6.149
12	2	10	13.23	27.98	10.69	21.63	8.14	14.85	11.49	21.64	12.60	13.92	13.71	7.822
9	3	5	13.05	32.82	10.57	24.16	8.11	12.87	11.55	21.04	12.66	10.71	13.86	5.764
4	2	10	13.20	34.97	10.72	24.81	8.35	11.60	11.85	23.20	13.02	9.64	14.28	4.399
7	2	1	12.90	33.72	10.48	24.78	8.35	12.36	11.52	22.81	12.66	10.36	13.83	5.363
7	3	10	13.35	34.09	10.81	23.80	8.35	12.33	11.73	22.58	12.90	10.20	13.95	5.352
12	1	5	13.14	28.61	10.66	22.44	8.17	14.14	11.52	21.15	12.66	11.61	13.80	6.943
7	1	1	12.87	35.00	10.39	24.93	8.35	12.13	11.22	24.58	12.39	10.18	13.65	5.212
12	2	14	13.26	28.23	10.75	22.35	8.23	14.16	11.64	20.24	12.72	11.69	13.95	7.155
4	3	14	13.14	32.92	9.34	23.85	15.60	8.56	11.55	23.52	12.66	8.74	13.89	3.040
7	1	10	13.08	32.64	10.63	23.94	8.17	12.62	11.55	22.20	12.63	10.66	13.83	5.527
4	2	1	13.11	30.82	10.63	23.11	8.35	11.76	11.49	23.37	12.63	9.825	13.86	4.788
12	3	1	13.02	30.69	10.48	23.28	8.05	14.70	11.49	20.64	12.54	12.28	13.71	7.337
9	3	1	13.08	33.60	10.54	23.81	8.02	12.65	11.40	22.11	12.51	10.68	13.62	5.696
9	3	14	13.20	32.21	10.72	23.00	8.29	13.13	11.67	20.22	12.69	11.03	13.83	6.109
4	1	14	13.29	33.75	10.81	23.85	8.35	11.83	11.49	22.69	12.66	9.84	13.83	4.867
12	3	5	13.29	28.81	10.81	21.73	8.29	14.47	11.64	20.37	12.72	12.28	13.92	7.228
7	3	1	12.93	33.16	10.45	25.21	8.02	12.65	11.49	21.91	12.57	10.67	12.57	5.608
4	1	1	13.02	33.83	10.51	24.58	8.35	11.10	11.49	22.46	12.60	8.98	13.77	3.250
7	3	5	12.87	35.52	10.42	26.16	8.35	12.48	11.67	23.94	12.72	10.44	13.98	5.489
12	2	5	13.11	28.89	10.66	22.97	8.20	14.11	11.61	19.66	12.72	11.55	13.89	6.912
7	1	14	12.93	35.19	10.51	25.00	8.35	12.06	11.31	24.93	12.57	10.10	13.83	5.144

7	2	10	13.14	35.32	10.66	25.76	8.35	12.22	11.64	23.68	12.69	10.20	13.89	5.301
12	1	1	10.53	27.77	10.54	22.03	7.90	14.07	11.20	20.60	12.51	11.51	13.83	6.860
9	1	10	13.26	32.58	10.75	23.25	8.20	12.72	11.61	21.14	12.78	10.70	13.89	5.746
7	2	5	13.11	34.02	10.60	24.03	8.14	12.58	11.52	22.07	12.57	10.62	13.77	5.491
4	2	5	13.05	35.14	10.57	25.06	8.35	11.78	11.61	23.37	12.81	9.842	13.89	4.817
9	2	14	13.32	30.32	10.78	22.80	8.29	13.38	11.64	21.01	12.69	11.35	13.80	6.559
7	1	5	13.20	31.44	10.72	21.60	8.35	11.98	11.40	22.28	12.63	9.949	14.07	5.088
12	2	1	13.14	28.45	10.63	22.19	8.08	16.14	11.52	20.52	12.57	14.87	13.71	8.983
9	2	5	13.14	30.91	10.63	23.58	8.20	13.29	11.67	20.64	12.72	11.16	14.04	6.181
4	1	10	13.11	36.63	10.66	26.29	8.35	11.70	11.58	25.44	12.78	9.798	13.95	4.720
4	1	5	13.32	35.14	10.84	25.22	8.41	11.27	11.37	25.20	12.63	9.603	13.89	4.199
12	1	10	13.08	29.02	10.57	23.24	8.11	14.07	11.58	20.57	12.69	11.51	13.89	6.801
9	2	1	13.29	32.45	10.72	23.61	8.17	12.87	11.55	20.63	12.69	10.72	13.86	5.858
4	3	10	13.38	33.11	10.90	23.81	8.47	11.55	11.43	23.82	12.75	9.611	14.16	4.367
7	3	14	13.23	31.81	10.75	21.98	8.35	11.86	11.55	21.99	12.69	9.848	13.92	4.932
7	1	14	12.93	35.19	10.51	25.00	8.35	12.06	11.58	24.93	12.57	10.10	13.83	5.144
9	1	14	13.20	30.46	10.72	23.13	8.26	13.14	11.49	19.80	12.81	11.14	14.01	6.149
9	2	14	13.32	30.32	10.78	22.80	8.29	13.38	11.55	21.01	12.69	11.35	13.80	6.559
4	1	1	13.02	33.83	10.51	24.58	8.35	11.10	11.52	22.46	12.60	8.978	13.77	3.250
4	2	5	13.05	35.14	10.57	25.06	8.35	11.78	11.55	23.37	12.81	9.842	13.89	4.817
12	2	10	13.23	27.98	10.69	21.63	8.14	14.85	11.64	21.64	12.60	13.92	13.71	7.822
4	2	1	13.11	30.82	10.63	23.11	8.35	11.76	11.85	23.37	12.63	9.817	13.86	4.788
9	2	10	13.32	29.68	10.81	22.86	8.29	13.35	11.64	20.82	12.66	11.28	13.92	6.319
12	2	14	13.26	28.23	10.75	22.35	8.23	14.16	11.61	20.24	12.72	11.69	13.95	7.155
7	2	14	12.90	35.21	10.36	25.63	7.90	12.53	11.40	22.07	12.45	10.50	13.50	5.491
9	3	10	13.17	32.66	10.66	24.57	8.14	12.98	11.52	20.82	12.63	10.73	13.71	5.898
9	3	5	13.05	32.82	10.57	24.16	8.11	12.87	11.70	21.04	12.66	10.71	13.86	5.764
12	2	1	13.14	28.45	10.63	22.19	8.08	16.14	11.49	20.52	12.57	14.87	13.71	8.983
4	1	14	13.29	33.75	10.81	23.85	8.35	11.83	11.55	22.69	12.66	9.845	13.83	4.867
4	2	10	13.20	34.97	10.72	24.81	8.35	11.60	11.85	23.20	13.02	9.638	14.28	4.399
4	3	14	13.14	32.92	9.34	23.85	15.60	8.560	11.52	23.52	12.66	8.738	13.89	3.040
7	3	5	12.87	35.52	10.42	26.16	8.35	12.48	11.73	23.94	12.72	10.44	13.98	5.489
9	1	1	12.99	32.98	10.54	24.39	8.08	13.03	11.52	21.21	12.66	10.89	13.83	5.964
7	2	1	12.90	33.72	10.48	24.78	8.35	12.36	11.22	22.81	12.66	10.36	13.83	5.363
12	1	5	13.14	28.61	10.66	22.45	8.17	14.14	11.64	21.15	12.66	11.61	13.80	6.943
7	1	10	13.08	32.64	10.63	23.94	8.17	12.62	11.55	22.20	12.63	10.66	13.83	5.527
9	3	1	13.08	33.60	10.54	23.81	8.02	12.65	11.55	22.11	12.51	10.68	13.62	5.696
7	1	1	12.87	35.00	10.39	24.93	8.35	12.13	11.49	24.58	12.39	10.18	13.65	5.212
9	2	1	13.29	32.45	10.72	23.62	8.17	12.87	11.49	20.63	12.69	10.72	13.86	5.858
12	2	5	13.11	28.89	10.66	22.97	8.20	14.11	11.40	19.66	12.72	11.55	13.89	6.912
4	3	5	13.26	33.19	10.75	24.15	8.35	11.60	11.67	22.80	12.90	9.755	14.10	4.693
9	2	5	13.14	30.91	10.63	23.58	8.20	13.29	11.49	20.64	12.72	11.16	14.04	6.181
7	3	14	13.23	31.81	10.75	21.98	8.35	11.86	11.64	21.99	12.69	9.848	13.92	4.932
12	3	10	13.11	30.25	10.63	23.67	8.14	14.73	11.49	20.26	12.60	12.76	13.86	7.381
9	1	10	13.26	32.58	10.75	23.25	8.20	12.72	11.49	21.14	12.78	10.70	13.89	5.746
12	1	14	13.32	27.93	10.81	21.99	8.29	13.61	11.67	20.37	11.64	11.46	14.07	6.654
4	1	5	13.32	35.14	10.84	25.22	8.41	11.27	11.61	25.20	12.63	9.603	13.89	4.199
12	3	14	10.59	29.76	10.60	23.09	8.08	13.80	11.31	20.11	12.63	11.47	13.83	6.709
12	1	10	13.08	29.02	10.57	23.24	8.11	14.07	11.64	20.57	12.69	11.51	13.89	6.801
9	1	5	13.23	31.66	10.72	22.82	8.17	13.09	11.19	19.96	12.69	10.92	13.89	5.968
7	3	10	13.35	34.09	10.81	23.80	8.35	12.33	11.61	22.58	12.90	10.20	13.95	5.352
4	1	10	13.11	36.63	10.66	26.30	8.35	11.70	11.52	25.44	12.78	9.798	13.95	4.720
7	1	5	13.20	31.44	10.72	21.61	8.35	11.98	11.61	22.28	12.63	9.949	14.07	5.088
7	2	5	13.11	34.02	10.60	24.03	8.14	12.58	11.64	22.07	12.57	10.62	13.77	5.491
12	3	1	13.02	30.69	10.48	23.29	8.05	14.70	11.40	20.64	12.54	12.28	13.71	7.337
12	3	5	13.29	28.81	10.81	21.73	8.29	14.47	11.52	20.37	12.72	12.28	13.92	7.228

12	1	1	10.53	27.77	10.54	22.04	7.90	14.07	11.67	20.61	12.51	11.51	13.83	6.860
4	2	14	13.08	35.43	10.57	25.06	8.35	11.12	11.58	24.03	12.63	9.55	13.77	4.056
9	3	14	13.20	32.21	10.72	23.01	8.29	13.13	11.37	20.22	12.69	11.03	13.83	6.109
4	3	10	13.38	33.11	10.90	23.81	8.47	11.55	11.58	23.82	12.75	9.611	14.16	4.367
7	2	10	13.14	35.32	10.66	25.76	8.35	12.23	11.55	23.68	12.69	10.20	13.89	5.301
4	3	1	13.05	33.35	10.57	23.77	8.35	11.10	11.43	21.04	12.66	9.427	13.95	3.918
7	3	1	12.93	33.16	10.45	25.21	8.02	12.65	11.55	21.91	12.57	10.67	12.57	5.608

Apéndice D. Diagrama de Pareto para las discontinuidades 2-6.

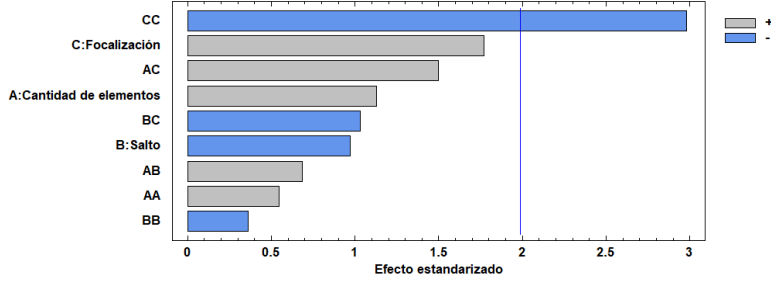
A continuación, se observa el resto de imágenes generadas por el *software* con respecto a la profundidad de la discontinuidad, aquí se observan las variables más influyentes.

Figura 24.

Diagramas de Pareto completos de la profundidad.

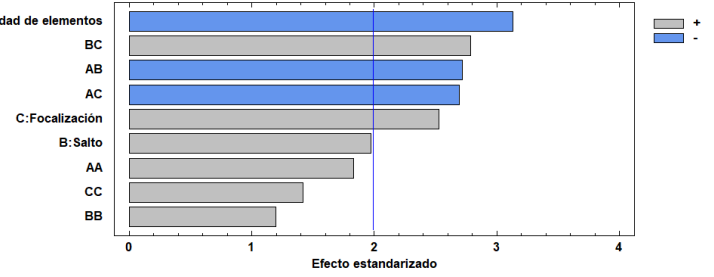
2

Diagrama de Pareto Estandarizada para Profundidad



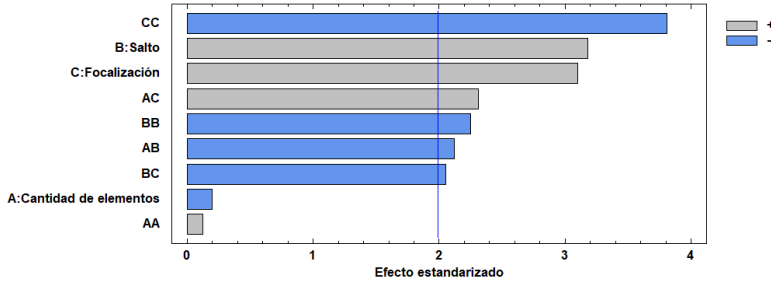
3

Diagrama de Pareto Estandarizada para Profundidad



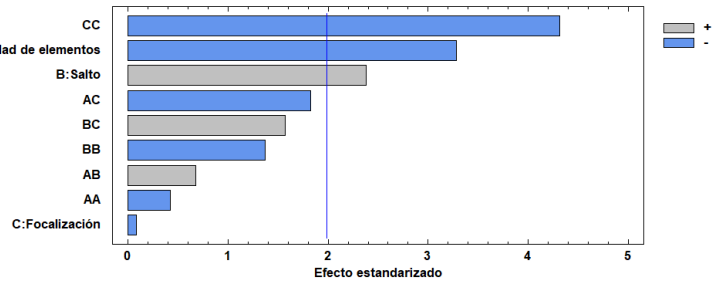
4

Diagrama de Pareto Estandarizada para Profundidad



5

Diagrama de Pareto Estandarizada para Profundidad



6

Diagrama de Pareto Estandarizada para Profundidad

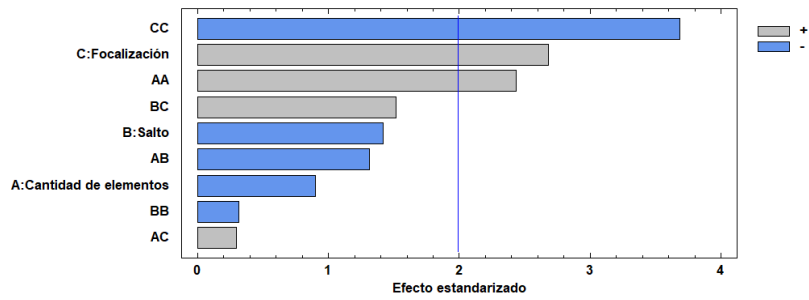
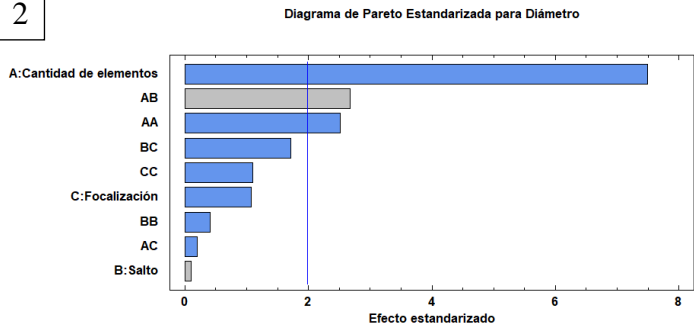


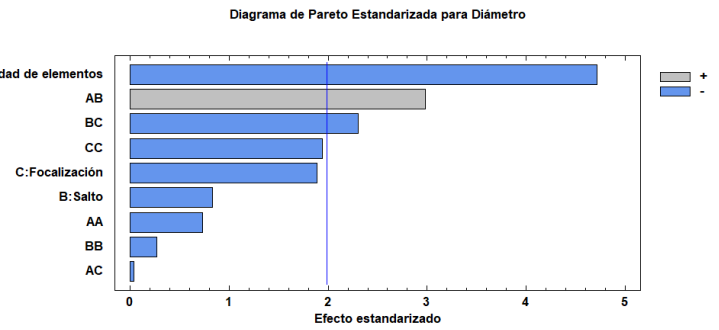
Figura 25.

Diagramas de Pareto para el diámetro.

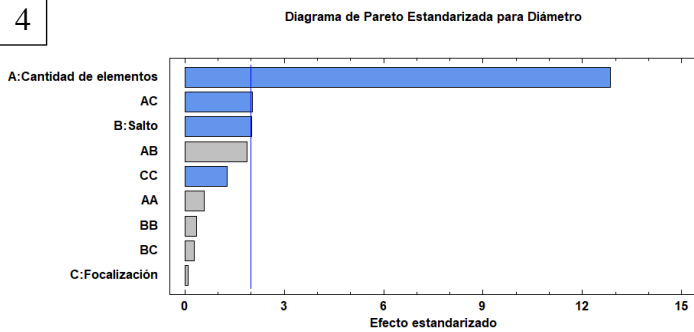
2



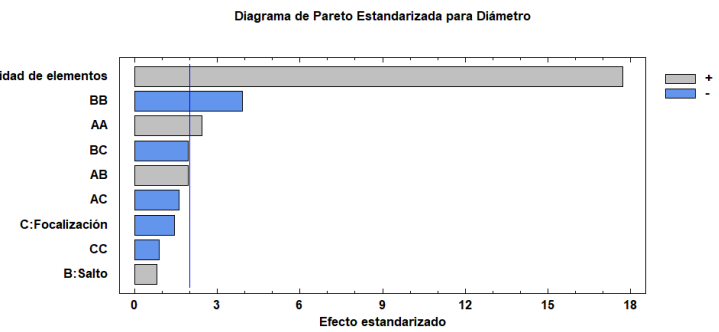
3



4



5



6

