

Diseño de un procedimiento para la verificación de sensibilidad y resolución a sistemas de inspección de corrosión a partir de mapeos c-scan con la técnica *phased array ultrasonic testing*.

Mayer Zulay Díaz mantilla y Kevin Armando Rincón Bermudez

Proyecto de grado para optar el título de Ingeniero Metalúrgico

Director

Carlos Andrés galán pinilla

Magister en ingeniería de materiales

Codirector

Ana María Pérez Ceballos

Doctora en ingeniería

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico Químicas

Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales

Bucaramanga

2021

Tabla de Contenido

	Pag
Introducción	8
1. Objetivos	10
1.1 objetivo general	10
1.2 Objetivos específicos	10
2. Resultados	11
2.1 Generalidades de inspección por ultrasonido	11
2.2 Técnica de ultrasonido <i>phased array</i>	11
2.3 Mecanismos de daño en tuberías	13
2.3.1 selección de mecanismos de daño representativos	21
2.3.1.1 Erosión	21
2.3.1.2 Cavitación	22
2.3.1.3 Metal Dusting	24
2.4 tipos de escaner para mapeos de corrosion <i>phased array ultrasonic testing</i>	24
2.5 Diseño del bloque patrón	26
2.5.1 Consideraciones para la evaluación del bloque patrón	30
2.5.1.1 Evaluación de cavitación	30
2.5.1.2 Evaluación de erosión	30
2.5.1.3 Evaluación de metal dusting	31
2.5.2 Bloques patron para <i>phased array ultrasonic testing</i>	32

2.6 Resolución y sensibilidad en sistemas de inspección por ultrasonido.....	33
2.7 Procedimiento de evaluación de la técnica <i>phased array ultrasonic</i>	35
3. Conclusiones.....	43
4. Recomendaciones	44
5. Referencias Bibliograficas	46

Lista de Tablas

	Pag
Tabla 1 Mecanismos de daño presentes en tuberías del transporte de hidrocarburos	15
Tabla 2 Representación visual de los Mecanismos de daño presentes en tuberías del transporte de hidrocarburos	19
Tabla 3 Algunos tipos de escáner para mapeos de corrosión Phased Array Ultrasonic Testing ..	25
Tabla 4 Representación visual del diseño del bloque patrón	32
Tabla 5 Tipos de bloques para Phased Array Ultrasonic Testing	33
Tabla 6 Combinación de los factores por barrido de la técnica PAUT.	39
Tabla 7 Parámetros variables para la aplicación de la técnica PAUT.	40
Tabla 8 Parámetros fijos para la aplicación de la técnica PAUT en todos los planes de inspección	40

Lista de Figuras

	Pag
Figura 1 Esquema de los tiempos de retardos PAUT.	12
Figura 2 Representación del campo cercano y el campo lejano (ultrasonido convencional).	13
Figura 3 Representación del proceso de corrosión por erosión.	22
Figura 4 Daños por cavitación: implosión de burbujas.	23
Figura 5 Carcasa de modelo a12.....	28
Figura 6 Representación del paso y apertura del equipo PAUT.....	28
Figura 7 Transductor Olympus 5L64 A12.....	29
Figura 8 Señal del reflector de referencia antes y después de la calibración de la sensibilidad en la vista A-Scan.	34
Figura 9 Resultados de inspección de barrenos cercanos entre sí.: Ejemplo de imagen de resolución lateral de diez (10) perforaciones de 0.5 mm espaciadas 0.5 mm en un gancho de campanario de rotor.	35
Figura 10 Esquema para el desarrollo del procedimiento de evaluación de PAUT.	37
Figura 11 Imagen C-scan de tres daños representativos.....	42
Figura 12 Representación del barrido para PAUT.	42

Resumen

Título: Diseño de un procedimiento para la verificación de sensibilidad y resolución a sistemas de inspección de corrosión a partir de mapeos c-scan con la técnica *phased array ultrasonic testing*. *

Autor: Mayer Zulay Díaz Mantilla, Kevin Armando Rincón Bermúdez*

Palabras clave: phased array ultrasonic testing, mecanismos de daño, bloque patron, sensibilidad, resolución, discontinuidades

Descripción: Dentro de los Ensayos No Destructivos ampliamente utilizados para la inspección de materiales y componentes sobresale la técnica *PHASED ARRAY ULTRASONIC TESTING (PAUT)*. Esta es utilizada comúnmente para la detección de discontinuidades como las que se presentan en las soldaduras, y para la evaluación de los diferentes mecanismos de daño por corrosión. En esta técnica los elementos piezoeléctricos organizados dentro del transductor se pulsan de tal manera que los múltiples componentes de haz se combinen entre sí y formen un frente de onda que se desplaza en la dirección deseada. Sin embargo, esta técnica puede llegar a presentar errores en las mediciones por variaciones en la sensibilidad y resolución conduciendo a posibles incertidumbres en los datos obtenidos, aspecto asociado con la complejidad y versatilidad en su configuración y a la calibración de las variables de inspección.

Por tal motivo, en el presente trabajo se hizo un estudio bibliográfico, revisando detalladamente y posteriormente seleccionando algunos mecanismos de daño que afectan las tuberías de transporte de hidrocarburos que son representativos de interés para ser detectables por mapeos de corrosión a partir de C-scan, información que se utilizó para diseñar un bloque patrón, que incluye discontinuidades ideales con características geométricas que simulan los daños permitiendo proponer una metodología para evaluar las variables involucradas en la inspección y determinar cuantitativamente la sensibilidad (menor diámetro) y resolución (morfología de los daños), además, de aportar información que permita realizar configuraciones y calibraciones con porcentajes de error menores, o con mayor sensibilidad y resolución.

* Trabajo de grado

* Facultad de Ingeniería Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería y Ciencia de los Materiales. Director: Carlos Andrés Galán Pinilla, Magister en Ingeniería de Materiales. Codirector: Ana María Pérez Ceballos, Doctora en Ingeniería

Abstract

Title: design of a procedure for the verification of sensitivity and resolution of corrosion inspection systems from c-scan mapping with the phased array ultrasonic testing technique.*

Author: mayer zulay diaz mantilla, kevin Armando Rincon Bermudez*

Key words: phased array ultrasonic testing, damage mechanisms, pattern block, sensitivity, resolution, discontinuities

Description: the *phased array ultrasonic testing (paut)* technique is one of the most widely used non-destructive tests for the inspection of materials and components. This is commonly used for the detection of discontinuities such as those occurring in welds and for the evaluation of different corrosion damage mechanisms. In this technique piezoelectric elements arranged within the transducer are pulsed in such a way that multiple beam components combine with each other and form a wavefront that travels in the desired direction. However, this technique can present errors in the measurements due to variations in sensitivity and resolution leading to possible uncertainties in the data obtained, an aspect associated with the complexity and versatility in its configuration and the calibration of the inspection variables.

For this reason, in this work a bibliographic study was made, reviewing in detail and subsequently selecting some damage mechanisms that affect hydrocarbon transport pipelines that are representative of interest to be detectable by corrosion mapping from c-scan, information that was used to design a pattern block, which includes ideal discontinuities with geometric characteristics that simulate the damage, allowing to propose a methodology to evaluate the variables involved in the inspection and to quantitatively determine the sensitivity (smaller diameter) and resolution (morphology of the damage), in addition, to provide information that allows making configurations and calibrations with lower error percentages, or with higher sensitivity and resolution.

* Degree work

* * Faculty of Physicochemical Engineering. School of Engineering and Materials Science. Adviser: Carlos Andrés Galán Pinilla, M.Sc. in Materials Engineering. Co-Adviser: Ana María Pérez Ceballos, PhD in Engineering.

Introducción

Los Ensayos No Destructivos, END, son pruebas realizadas a una pieza o material durante su fabricación o servicio, sin alterar sus propiedades físicas, químicas, mecánicas, metalúrgicas o dimensionales. Dichos ensayos permiten conocer información del componente, identificar mecanismos de daño por corrosión, y detectar discontinuidades (superficiales o internas) que afecten la integridad de la operación de la pieza, siendo *Phased Array Ultrasonic Testing (PAUT)* una técnica avanzada que ha venido siendo utilizada recientemente como solución para detectarlas oportunamente (ASNT, 2007). *PAUT* es una técnica utilizada en una amplia variedad de aplicaciones de inspección y medición (Lozev, M. G., Smith, R. W., & Grimmitt, B. B, 2003). Lo anterior se da por la posibilidad de obtener visualizaciones bidimensionales en tiempo real de los resultados y múltiples configuraciones de barridos realizados simultáneamente, tanto a cero grados como con múltiples ángulos empleando una sola zapata, registrando información de todo el barrido que se realice mediante el uso de un *enconder*, adaptado al palpador, registrando la distancia que se desplaza a lo largo de la pieza, codificada para el posicionamiento, dimensionamiento de defectos en el eje de escaneo sincronizando la adquisición de datos con el movimiento del palpador (Olympus Corporation, 2020). No obstante, esta técnica puede llegar a presentar errores en las mediciones por variaciones en la sensibilidad y resolución conduciendo a posibles incertidumbres en los datos obtenidos, aspecto asociado con la complejidad en la configuración y calibración de las variables de inspección (A. Boiler, 2019). Por lo anterior, en la presente monografía se diseñó un procedimiento para realizar la verificación de la sensibilidad y la resolución de mapeos C-scan con la técnica *PAUT*, que es

aplicada a tuberías de acero, mediante un nuevo enfoque de diseño de bloque patrón que incluye discontinuidades ideales simulando daños reales de corrosión.

1. Objetivos

1.1 objetivo general

Diseñar un procedimiento para verificar la sensibilidad y resolución a sistemas de inspección de corrosión para tuberías metálicas a partir de mapeos C-scan con la técnica *Phased Array Ultrasonic Testing* (PAUT).

1.2 Objetivos específicos

Realizar una revisión bibliográfica de los mecanismos de daños más comunes por corrosión que afectan las tuberías de transporte de hidrocarburos los cuales son detectables por mapeos de corrosión.

Diseñar un bloque patrón con discontinuidades ideales que simulen daños por corrosión para la verificación de sensibilidad y resolución a sistemas de inspección de corrosión de la técnica de PAUT.

Proponer un procedimiento para determinar cuantitativamente la sensibilidad y resolución a sistemas de inspección de daños por corrosión localizada en tuberías empleando el bloque patrón diseñado.

2. Resultados

2.1 Generalidades de inspección por ultrasonido

Este es un ensayo que funciona mediante la aplicación de ondas ultrasónicas de alta frecuencia que viajan a través de un medio hasta que se encuentran con un límite que representa otro medio (discontinuidades o límites entre materiales como la pared posterior de la pieza), lo cual hace que las ondas se reflejen de vuelta hacia la fuente de emisión. Estas reflexiones miden el espesor de una pieza o determinan la presencia de discontinuidades internas y pérdidas de material por corrosión (Olympus Corporation, 2020).

2.2 Técnica de ultrasonido *phased array*

Esta técnica utiliza múltiples elementos piezoeléctricos embebidos en un mismo transductor (ver figura 1) lo cual logra generar pulsos puntuales en momentos diferentes que interactúan entre sí. Esta secuencia de pulsos es seleccionada en el equipo que luego transmiten una serie de frentes de onda individuales al material de ensayo. Estos frentes de onda se combinan constructiva y destructivamente, formando un solo frente de onda primaria que viaja a través del material inspeccionado y se refleja en las discontinuidades y límites de materiales, como cualquier onda ultrasónica convencional (Figura 2) (Fuquen Sanabria, 2014).

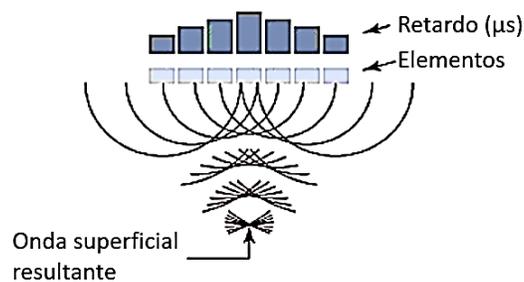
Las sondas de PAUT están compuestas de cristales piezoeléctricos que se pueden organizar de diferentes maneras y que pueden transmitir y recibir de manera independiente señales en distintos momentos. Las ondas emitidas deben converger de manera constructiva,

generando un frente de onda, que respecto al ángulo de dichas ondas van a converger en un punto focal. La profundidad a la que se encuentre el punto focal depende del ángulo de emisión de dichas ondas y del retraso temporal calculado de emisión entre ondas (Figura 1) (Testing, A., Cove, T., & Centre, I, 2020).

La estructura básica del palpador PAUT está compuesta de elementos piezoeléctricos, arreglados de diferentes formas y cableados de manera independiente y un cable coaxial multiconductor (Eclipse Scientific, 2020). La figura 1a representa el esquema del principio PAUT respecto al ultrasonido convencional de la Figura 2

Figura 1

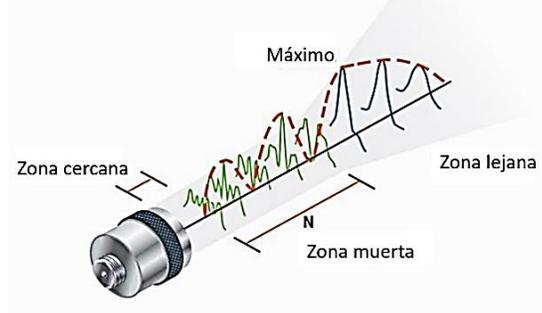
Esquema de los tiempos de retardos PAUT.



Nota: Imagen adaptada de M. Moles, Advances in Phased Array Ultrasonic Technology Application.

Figura 2

Representación del campo *cercano* y el campo *lejano* (ultrasonido convencional).



Nota: Imagen adaptada de Olympus. (Olympus Corporation, 2020)

Phased Array Ultrasonic Testing (PAUT) puede ser utilizada para los trabajos realizados por ultrasonidos convencionales. Por ejemplo, es utilizada para detectar y visualizar discontinuidades entre las cuales se incluyen grietas, huecos y picaduras que son causadas por la corrosión, también es posible utilizarla para medir el espesor del material y el revestimiento y para detectar cambios en las propiedades del material. Una de las aplicaciones más comunes es evaluar la calidad de las soldaduras y de los remaches, presentando múltiples ventajas, como rapidez, cantidad de información, versatilidad, entre otras. (Eddyfi Technologies, 2019-2021).

2.3 Mecanismos de daño en tuberías

Se entiende por corrosión al desgaste o deterioro de un material debido a la reacción con su ambiente, siendo este uno de los problemas más importantes a que se enfrentan los operadores y propietarios. Las reacciones de corrosión involucran la transferencia de carga del metal y el electrolito (REQUENA, 2012). A grandes rasgos existen dos tipos de corrosión, la corrosión

uniforme es aquella que se encuentra distribuida uniformemente sobre la superficie de un material, este tipo de corrosión ocurre en zonas aisladas a lo largo de una tubería (Evert D.D. During, 2018), es influenciada por la presencia de impurezas y fases en el material, lo que lleva a una variación de energía potencial, formando electrodos (Salazar, 2015) y la corrosión localizada que se presenta en zonas pequeñas y específicas tomando la forma de cavidades, se desarrolla cuando la capa de óxido pasiva se degrada, haciendo que el hierro del metal se convierta en una disolución anódica local donde la pérdida de metal se acelera por la presencia de un ánodo pequeño y un cátodo mayor (Swagelok, 2020).

Se revisaron los mecanismos de daño por corrosión mencionados en la práctica API 571 (Dobis & French, 2004), entre otros documentos complementarios (H.R. Vanaei, 2017), donde se tuvo en cuenta características de daño, como: localizadas, que sus dimensiones fueran menores a 2 cm tanto en diámetro como en profundidad, esto debido a que el enfoque de la técnica es la detección temprana, sin descartar que los daños seleccionados puedan ser de mayores dimensiones debido a la variación de tamaño con el tiempo de servicio, la descripción de su morfología y la dificultad para su detección, por tanto se clasificó de manera cualitativa entre alta, media o baja con la finalidad de estudiar la confiabilidad de los resultados de la técnica PAUT.

Otro de los parámetros que se estudió de dichos mecanismos fue la posibilidad de poder mecanizar el daño por la técnica de electroerosión por penetración, EDM, proceso mecanizado de alta precisión de fabricación no convencionales que consiste en la generación de un arco eléctrico entre una pieza y un electrodo en un medio para arrancar partículas de la pieza hasta conseguir reproducir en ella las formas del electrodo (Venkata N. Raju Jampana, 2021).

A continuación, se presentan los mecanismos de daño que afectan a las tuberías de transporte de hidrocarburos de interés para este trabajo de investigación, los cuales se muestran en la tabla 1, donde se detalla la morfología, y algunas técnicas de inspección recomendadas para su detección, seguidamente en la tabla 2, se presenta un registro fotográfico de los mismos mecanismos. Las dimensiones de los daños corresponden a un rango normal (diámetro) en el que podrían presentarse y ser de interés para la detección oportuna con barridos C-Scan, sin embargo, existen casos con dimensiones por fuera del rango presentado. Estos datos fueron obtenidos de la revisión bibliográfica y fueron tomados como base para definir en el presente trabajo la dificultad de detección.

Tabla 1

Mecanismos de daño presentes en tuberías del transporte de hidrocarburos

Mecanismos de daño	Morfología	Dimensiones [cm] Y técnicas de inspección.	Dificultad para detección	Referencias
Erosión	Pérdida localizada de espesor en forma de hoyos, surcos, barrancos, olas, agujeros o redondeados (tabla 2.a).	1 – 10 PAUT-RT	Media	(Evert D.D. During, 2018)
Cavitación	Picadura de punta afilada (tabla 2.b).	0.5 – 3 PAUT-RT	Alta	(Evert D.D. During, 2018)
Grietas de recalentamiento	Se presenta de manera intergranular y puede romperse o incrustarse (tabla. 2.c).	2 – 6 PAUT-MT	Media	(American Petroleum Institute, 2011)
Oxidación	Se sufre un adelgazamiento debido a la oxidación (tabla 2.d).	0.7 – 10 PAUT	Media	(American Petroleum Institute, 2011)

Mecanismos de daño	Morfología	Dimensiones [cm] Y técnicas de inspección.	Dificultad para detección	Referencias
Corrosión CO₂	Se presenta como picaduras por corrosión, puede sufrir perforaciones profundas y ranuras en el área de turbulencia (tabla. 2.e).	2– 8 PAUT-VT-RT	Media	(Islam et al., 2021)
Fragilidad por hidrógeno (HE)	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-PAUT-RT	Media	(Evert D.D. During, 2018)
Corrosión por aminas	Se presenta una fisuración por corrosión por tensión de aminas (tabla 2..g).	0.6 – 4 VT-PAUT	Media	(American Petroleum Institute, 2011)
Corrosión por bisulfuro de amonio	Pérdida general de espesor, altas pérdidas de pared o una corrosión extremadamente localizada (tabla.2.h).	0.1– 2 PAUT-RT	Alta	(American Petroleum Institute, 2011)
Corrosión por ácido nafténico	Se caracteriza por una corrosión localizada, corrosión por picadura o perdida uniforme del espesor (tabla.2.i).	0.5 – 6 PAUT-RT	Media	(American Petroleum Institute, 2011)
Corrosión por ácido fluorhídrico	Se puede presentar agrietamiento y perdida de espesor (tabla.2.j).	3– 8 PAUT-RT	Alta	(American Petroleum Institute, 2011)
Corrosión por alta temperatura H₂/H₂S	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-VT-RT	Media	(Evert D.D. During, 2018)
Corrosión por ácido sulfúrico	Ocurre un ataque de depósito insuficiente localizado (tabla 2.1).	0.5 – 5 PAUT-RT	Media	(American Petroleum

Mecanismos de daño	Morfología	Dimensiones [cm] Y técnicas de inspección.	Dificultad para detección	Referencias
				Institute, 2011)
<i>Metal dusting</i>	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	Media	(Evert D.D. During, 2018)
Corrosión Microbiológicamente Inducida (MIC)	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-VT- RT	Media	(Evert D.D. During, 2018)

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

Nota: Información adaptada de Evert D.D During, 2018 y American petroleum institute, 2011

Otra característica de dichos mecanismos (tabla 1) es la posibilidad de ser mecanizadas por la técnica de electroerosión por penetración en un bloque patrón, ya que, por sus pequeñas dimensiones, este tipo de mecanizado permite obtener formas complejas, esto tiene que ver con la forma del electrodo, que tiene la figura particular que se copiará, esta debe ser de fácil mecanizado en un torno, siendo fundamental para la obtención de datos de la técnica PAUT. A continuación, en la tabla 2, se incluye la representación gráfica de los mecanismos de daño de una forma general, estas imágenes son incluidas debido a la importancia de la morfología de los daños para el diseño del bloque patrón.

Los mecanismos estudiados muestran una relación inversa entre sus dimensiones y su dificultad para detectarlas, entre más pequeño sea el daño será más difícil detectarlos, teniendo

en cuenta que la resolución de la técnica para detectar pequeñas discontinuidades, depende de la longitud de onda (por lo tanto, de la frecuencia) y características del transductor, del haz ultrasónico generado, el tiempo de uso, entre otras. Siendo de interés conocer el efecto de cada una sobre el error generado y máxima sensibilidad obtenida. Para disminuir la atenuación del ultrasonido se busca emplear bajas frecuencias, pero éstas deben ser lo suficientemente altas como para alcanzar la sensibilidad requerida para detectar el mínimo tamaño de defecto establecido (Fuquen Sanabria, 2014), esto sugiere que se deba conocer o tener acceso a una metodología para verificar la sensibilidad y resolución de cada sistema de la técnica PAUT; en la tabla 2 se observa la morfología de estos daños, que sirven como base para diseñar daños ideales con características representativas.

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)



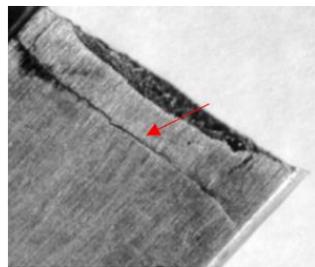
C. Grietas de recalentamiento(American Petroleum Institute, 2011)



D. Oxidación(American Petroleum Institute, 2011)



E. Corrosión CO2(American Petroleum Institute, 2011)



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



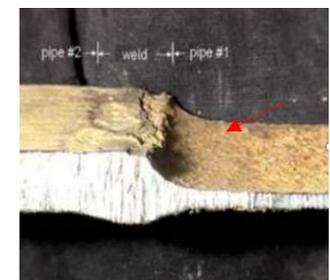
G. Corrosión por aminas(American Petroleum Institute, 2011)



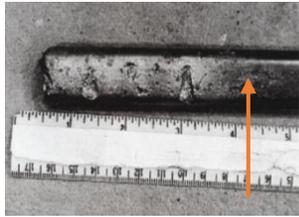
H. Corrosión por bisulfuro de amonio(American Petroleum Institute, 2011)



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



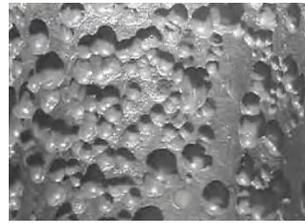
J. Corrosión por ácido fluorhídrico(American Petroleum Institute, 2011)



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. Corrosion acanalada provocada por estancamiento de agua.

2.3.1 Selección de mecanismos de daño representativos

Se seleccionaron los mecanismos de daño teniendo en cuenta que cumplieran con los parámetros: la facilidad de mecanizar: mediante electroerosión por penetración, la dificultad en cuanto a la detección (dificultad alta) y el tipo de la morfología del daño (localizado). Además, para la selección de los mecanismos de daño y sus dimensiones se tuvo en cuenta la posibilidad de realizar caracterización dimensional con microscopio HIROX, o con instrumentos de medición de alta exactitud (microscopios de medición, galgas de picadura y corrosión)(Luis & Idrovo, 2010), definiendo estos resultados como dimensiones de referencia para calcular el error respecto a los resultados de PAUT. Los mecanismos de daño seleccionados se describen a continuación:

2.3.1.1 Erosión. Esta consiste en el aumento del ataque a un metal por diferencias en la velocidad de un fluido corrosivo y la superficie del metal, en general, esta velocidad es alta, y a menudo intervienen efectos de desgaste mecánico y de abrasión.

La corrosión por erosión es el resultado de una turbulencia violenta en un determinado lugar concreto debido a una interrupción en el patrón de flujo, el metal se desprende de la superficie en forma de iones disueltos o productos de corrosión dimensionalmente estables que se desgastan mecánicamente de la superficie metálica, se puede reconocer generalmente por un patrón de flujo distintivo en forma de fosas lisas, surcos, olas o barrancos (figura 3).

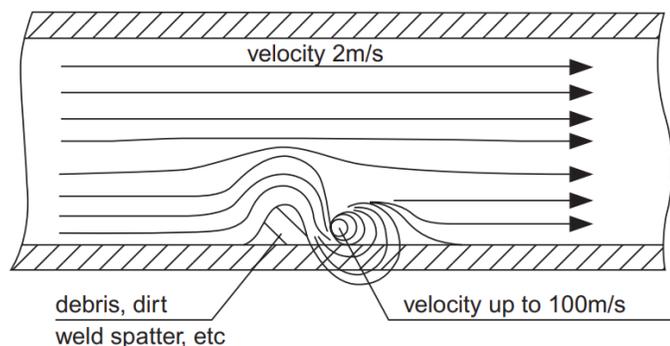
Dado que hay muchos factores que pueden contribuir a la corrosión por erosión, hay muchas medidas diferentes para controlar este problema. Algunas de ellas se mencionan a continuación:

- Reducir la velocidad y la turbulencia del fluido.

- Aplicar aleaciones resistentes.
- Reducir la cantidad de aire y partículas sólidas en los líquidos.
- Reducir la corrosividad del medio.(American Petroleum Institute, 2011)

Figura 3

Representación del proceso de corrosión por erosión.



Nota: Imagen tomada de (American Petroleum Institute, 2011)

2.3.1.2 Cavitación Esta es una forma particular de corrosión causada por la formación e implosión de burbujas de gas en un líquido cerca de una superficie metálica. Puede dañar una película protectora, dando lugar a ataque a la superficie.

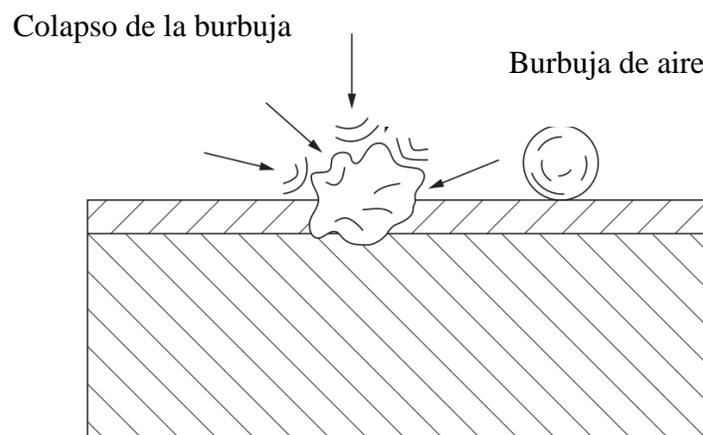
La cavitación es el proceso por el que las variaciones de presión en un líquido pueden provocar, en un breve periodo de tiempo, la formación de innumerables cavidades que luego implosionan. Las cavidades se llenan de vapor de líquido y de los gases presentes en el líquido. En efecto, el líquido comenzará a hervir localmente debido a la reducción de la presión por debajo la presión de vapor. Al igual que en el proceso de ebullición, la aparición de cavitación requiere la presencia de núcleos en forma de contaminantes o burbujas de aire, a menudo

atrapados en grietas o ranuras en la superficie sólida. Tan pronto como la presión se eleva de nuevo por encima de la presión de vapor, las burbujas de vapor implosionarán causando ondas de choque de alta presión de alta presión con presiones de hasta 400 mpa, suficientes para dañar cualquier metal (figura 4). La mejor manera de controlar la cavitación es tomando medidas en la fase de diseño:

- Evitar fuertes turbulencias y variaciones de presión mediante un dimensionamiento adecuado.
- Utilizar válvulas multietapa para que la caída de presión sea escalonada.
- Especificar un acabado liso.
- Utilizar materiales resistentes a la cavitación (American Petroleum Institute, 2011)

Figura 4

Daños por cavitación: implosión de burbujas.



Nota: Imagen tomada de (American Petroleum Institute, 2011)

2.3.1.3 Metal Dusting. Es una forma especial de carburación que se produce en aceros de baja aleación, aceros al cromo, aceros inoxidable austeníticos, aceros inoxidable, austeníticos y aleaciones de níquel y cobalto en el rango de temperatura entre 450°C y 800°C. Los materiales se desintegran en una mezcla de polvo de carbono, partículas metálicas y, a veces, óxidos y carburos metálicos. Estos productos de corrosión se eliminan fácilmente en una corriente de gas, dejando surcos y picaduras en la superficie del metal.

El *metal dusting* va siempre precedido de una carburación interna, en la que se adhiere el cromo. Posteriormente, el resto de la matriz de Fe o Fe-Ni reacciona para formar el inestable carburo M₃C, que se desintegra en partículas de metal y carbono.

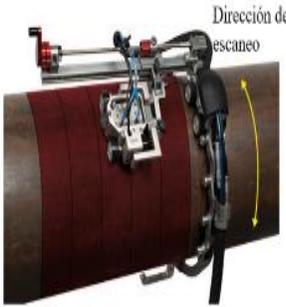
La resistencia al *metal dusting* depende únicamente de la capacidad de formar una piel estable de Cr₂O₃. Los aceros ferríticos con alto contenido de cromo son, por lo tanto, muy resistentes, mientras que los aceros ferríticos que contienen entre un 12% y un 13% de Cr son más sensibles a este fenómeno. Debido a su baja capacidad de difusión del cromo, los aceros austeníticos son muy sensibles, especialmente las aleaciones con un 30% de Ni (aleación 800 y AC 66). (American Petroleum Institute, 2011)

2.4 Tipos de escáner para mapeos de corrosión phased array ultrasonic testing

En la tabla 3 se presentan los principales sistemas o *scanners* de inspección con C-Scan disponibles comercialmente para el mapeo de corrosión, el cual puede ser de mayor o menor complejidad, esto según si se incluyen barridos en las dos direcciones, movimiento automatizado o semiautomático y el número de transductores instantáneos que permiten se adapten.

Tabla 3

Algunos tipos de escáner para mapeos de corrosión Phased Array Ultrasonic Testing

	Tipo de escáner	Características	Referencias
HydroFORM	 <p>Dirección de escaneo</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Mapeo de la corrosión de alta capacidad para superficies rugosas e irregulares. -Eliminación de la reflexión de la suela. -Acoplamiento optimizado. -Proporciona una excelente resolución cerca de la superficie. 	(OLYMPUS, 2021)
RexoFORM		<ul style="list-style-type: none"> -Mapeo de corrosión fácil y rápido para superficies lisas y áreas de acceso limitado. -Excelente cobertura de superficies. -Funciona sin necesidad de un suministro continuo de agua. -Más pequeña, más ligera y perfecta para áreas de acceso limitado. 	OLYMPUS, 2021
LYNCS FULL		<ul style="list-style-type: none"> -Portabilidad, peso liviano ideal para accesos verticales y áreas de acceso restringido. -Versatilidad de inspección con múltiples opciones de montaje de sonda -Maximice la utilización, un escáner para dos tipos de inspección. 	(Mess, 2021)

	Tipo de escáner	Características	Referencias
<p style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Scorpion2</p> 		<ul style="list-style-type: none"> -Alta velocidad, complete un escaneo de 10 metros en menos de un minuto. -Sonda rodante acoplada en seco para una configuración rápida y sencilla. -Acceso remoto hasta 50 m. -Puertas UT flotantes y de seguimiento para resultados repetibles y confiables. 	<p>(Technologies, 2019)</p>

2.5 Diseño del bloque patrón

El diseño del bloque patrón se enfocó en la posibilidad de mecanizar daños simulados con características morfológicas y dimensionales similares a los daños que cumplen los requisitos definidos en el presente proyecto, con el fin de evaluar la respuesta de la técnica en condiciones ideales, pero cercanas a la realidad, enfoque que muy poco se ha investigado por otros autores (Suarez & Diaz, 2015) Y surge como continuidad a trabajos realizados, en los cuales se emplean bloques con barrenos de fondo plano FBH (*flat Botton hole*), en el que se obtuvieron resultados con porcentajes de error variables, mostrando que pueden ser daños poco representativos (Cañas, Peña, 2020), por tal motivo el bloque se diseñó con el objetivo de obtener mediciones de tres mecanismos de daño, que serán mecanizados sobre el mismo. Esto, ya que, al tener daños parecidos a los observados en la realidad, se podría comprender mejor la operación de la técnica, su confiabilidad, incluso la diferencia entre distintos fabricantes de equipos, no obstante, existen más mecanismos de daño y morfologías que no se incluyen en el presente estudio.

Los mecanismos de daño de interés se caracterizan por ser de tipo localizado para ser inspeccionados posteriormente por mapeo de corrosión. La morfología y las dimensiones de cada uno de los daños son de gran importancia, al momento de mecanizarlos en el bloque patrón, por tanto, los mecanismos con menores dimensiones presentan mayor dificultad en cuanto a su detección, convirtiéndose así en el de mayor interés para ser analizados, esto, dado que corrosiones con pérdidas de mayores dimensiones y de morfologías más simples pueden ser inspeccionados utilizando el equipo de medición de espesores y el porcentaje de error disminuye siendo irrelevante (FORERO GARCIA, 2005).

El bloque patrón diseñado tiene los siguientes alcances: verificar la sensibilidad y resolución del sistema, estos dependen de la configuración y calibración, operación interna del equipo y del transductor. Con el bloque diseñado se podrá verificar la confiabilidad de los resultados obtenidos por inspectores certificados que estén a cargo de la operación del equipo. Para el diseño del bloque se tuvieron en cuenta algunos bloques que recientemente han sido comercializados (OLYMPUS, 2015b)

Con el objetivo de diseñar el bloque de manera adecuada se realizó una descripción del equipo disponible en el laboratorio de Ensayos No Destructivos de la Universidad Industrial de Santander (UIS) ampliamente utilizado en campo de Ensayos No Destructivos, las características se presentan a continuación: La apertura máxima es de 38.4 mm, obtenida con base en el máximo número de elementos activos, 16, que se desplaza por el área de cobertura de 64 elementos y un paso de 0.60 mm (figura 6), transductor mostrado en la figura 7 (GUZMÁN PLAZAS, 2018). Las dimensiones externas del transductor son de 45 mm, 23 mm y 20 mm, siendo respectivamente la longitud, ancho y alto, ver figura 5 (OLYMPUS, 2015c). La apertura es el máximo ancho que podría abarcar o cubrir el palpador en cada barrido, cuando la apertura

es de un tamaño inferior al material o defecto al cual se quiere analizar mediante PAUT, se debe realizar los barridos contiguos suficientes para que alcance a cubrir toda la superficie del material.

Figura 5

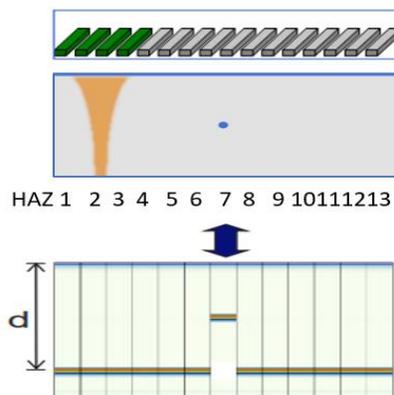
Carcasa de modelo12



Nota: Imagen tomado de (OLYMPUS, n.d.-a)

Figura 6

Representación del paso y apertura del equipo PAUT.



Nota: Imagen tomada de (OLYMPUS, n.d.-a)

Figura 7

Transductor Olympus 5L64 A12



Nota: Imagen tomada de (OLYMPUS, n.d.-a)

Mediante mapeos de corrosión C-scan, se obtendrá información cuantitativa (diámetro y espesor) y cualitativa (morfología y detección) entre otras, información relacionada de cómo debería observarse estos daños en tuberías de hidrocarburos que han estado en funcionamiento activo.

Bajo el interés de la presente investigación, los mecanismos de daño seleccionados para el diseño del bloque patrón son: cavitación (tabla 4c), erosión (tabla 4b) y *metal dusting* (tabla 4a). Los tres mecanismos de daño fueron seleccionados dado su baja dificultad de mecanizar, la alta dificultad en la detección y porque presentan diferencias en su morfología, las cuales fueron variantes de interés en la investigación, a continuación, se describen cada uno de ellos.

2.5.1 Consideraciones para la evaluación del bloque patrón

2.5.1.1 Evaluación de cavitación Este mecanismo de daño se caracterizó por dos variables para el diseño del bloque patrón, estas fueron el diámetro, la relación entre dicho diámetro y la profundidad. Siendo los barrenos de fondo curvo seleccionados, fabricando tres, con diámetros diferentes: el primero (D): 0.5[cm], el segundo, (G):1[cm] y el tercero (H):2[cm], las profundidades son para el primero (D): 0.4[cm], el segundo, (G):0.3[cm] y el tercero (H):0.2[cm], indicados de izquierda a derecha respectivamente como se indica en el bloque patrón, estas dimensiones están dadas con el interés de evaluar la sensibilidad del equipo en la medición de daños por cavitación ideales (ver tabla 4c).

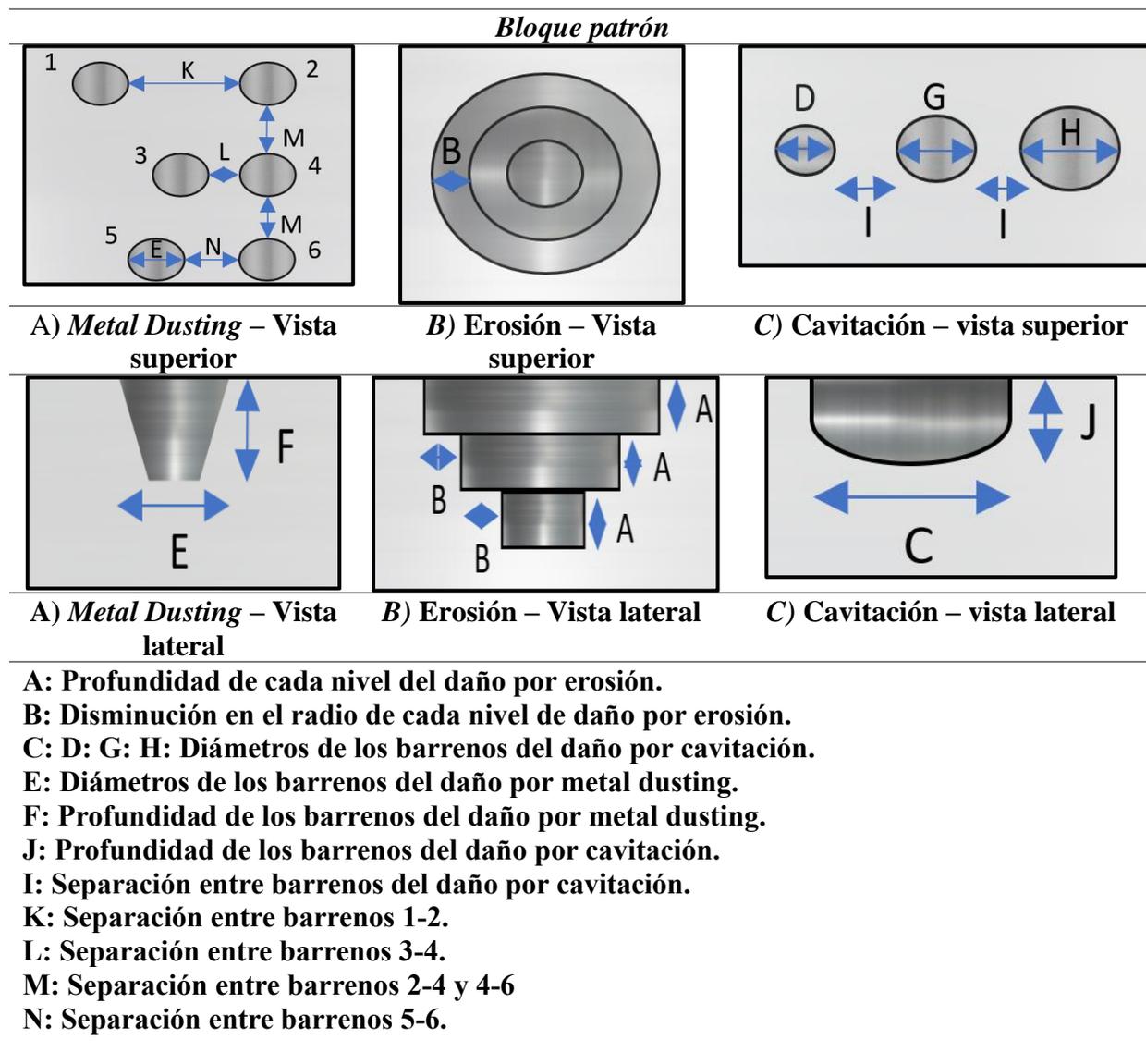
2.5.1.2 Evaluación de erosión Es un mecanismo de daño crítico como se observó en la tabla 1, este tipo de daño se diseñó por medio de perforaciones de fondo plano con reducciones consecutivas y de forma escalonada tanto para el diámetro como la profundidad con tres dimensiones. La primera perforación tendrá un diámetro de 1.5 [cm] y una profundidad de A (0.2 [cm]). La segunda perforación tendrá un diámetro de 1 [cm] y una profundidad de A (0.2 [cm]) al igual que la primera perforación, esta perforación fue realizada a una distancia constante B, medidos desde la perforación inicial a la perforación intermedia, esto se observa en la vista superior de la tabla 4. La tercera perforación tendrá un diámetro de 0.5 [cm] y una profundidad al igual que las dos anteriores perforaciones de A (0.2 [cm]), al igual que la distancia entre la segunda y primera perforación, la distancia entre la segunda y tercera perforación será de 0.25 [cm](B) (tabla 4b). El diseño del anterior daño se realizó con el objetivo de determinar el comportamiento del equipo ante un daño con pérdida variable que presenta múltiples

perforaciones de distintos diámetros y profundidades en un mismo espacio, según la información consultada (OLYMPUS, 2015a), es la segunda vez que se aborda la evaluación de este mecanismo de daño con bloques de comparación.

2.5.1.3 Evaluación de metal dusting Mediante *metal dusting* se evaluará la resolución en los resultados, al medir las perforaciones simulando el mecanismo de daño mecanizado sobre el bloque patrón, estas perforaciones presentan una forma cónica, donde el diámetro E es de 0.3 [cm], una profundidad F de 0.2 [cm] y una inclinación de 60° (tabla 4a). Se realizaron seis perforaciones con las dimensiones especificadas anteriormente, distribuidas de distinta manera en el bloque patrón, variando la separación entre ellas con el objetivo de evaluar la resolución del equipo. La distribución de las perforaciones se dará alineando tres de ellas (Daños o perforaciones #: 2, 4 y 6 de la tabla 4a) separadas una distancia M de 0.4 [cm] entre sí, se ubicará la quinta (5) perforación a una distancia N (0.4 [cm]) de la perforación número 6, la tercer (3) perforación será ubicada una distancia L de 0.4[cm] de la cuarta (4) perforación ubicada linealmente, por último, la primera perforación será ubicada una distancia K de 0.8 [cm] de la segunda (2) perforación ubicada linealmente (tabla 4). El arreglo de las perforaciones se diseñó de esta forma especial para contar como variable de estudio la separación entre dichas perforaciones, se debe realizar medición de las características dimensionales de cada daño, registrando estos valores como referencia para estimar el porcentaje de error respecto a las mediciones PAUT. Con base en el bloque diseñado se propondrá un procedimiento que permita obtener los datos para evaluar la sensibilidad y resolución del sistema de inspección de daños por corrosión mediante phased array.

Tabla 4

Representación visual del diseño del bloque patrón



2.5.2 Bloques patrón para phased array ultrasonic testing

En la tabla 5 se presentan los principales tipos de bloques estandarizados que existen para la calibración de del equipo PAUT de acuerdo con las características propias de cada pieza de estudio y los códigos de construcción aplicables.

Tabla 5

Tipos de bloques para Phased Array Ultrasonic Testing.

	Tipo de bloque	Descripción
Bloque PACS		<p>Nuevo bloque de calibración Phased Array utilizado para la verificación del haz angular, punto de salida del ángulo de la sonda, calibración para retardo de cuña, sensibilidad, DAC/TCG para espesores de hasta 2" y dimensionamiento de grietas.</p>
Bloque de evaluación PA ASTM E2491		<p>Este bloque es utilizado para la caracterización del haz y evaluación de las características de rendimiento del sistema, se usa como bloque de línea de base para determinar cambios de rendimiento de instrumentos a largo plazo, generar DAC curvas y evaluar la resolución lineal/angular, la capacidad de enfoque y la capacidad de dirección del haz.</p>
Bloque Phased Array tipo A (tipo IIW)		<p>Se utiliza durante la configuración y calibración, puede ser utilizado para realizar tareas tales como verificación del ángulo del haz, calibración para retardo de cuña, calibración de sensibilidad, entre otras.</p>
Bloque de calibración Phased Array		<p>Este bloque de calibración contiene todas las características requeridas en ASME Sección V, artículo 4.</p>

Nota: Información tomada de (Industry, 2014)

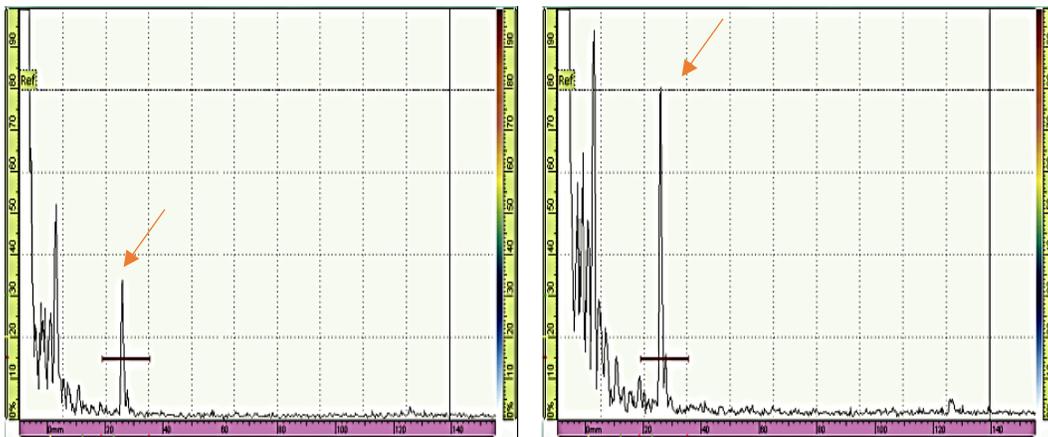
2.6 Resolución y sensibilidad en sistemas de inspección por ultrasonido

La sensibilidad y la resolución son dos términos comúnmente utilizados en la inspección con ultrasonido. Sensibilidad es la capacidad de localizar pequeñas discontinuidades en el ensayo, esta, generalmente, se incrementa al incrementar la frecuencia (disminuye la longitud de

onda). La sensibilidad se calibra durante la puesta a punto del equipo, y depende del tipo de reflector empleado, la calidad del transductor y el buen funcionamiento del equipo por estar directamente relacionado con la amplitud de las señales como se señala en la figura 8. La Resolución es la capacidad del sistema de detectar fisuras y discontinuidades que se encuentran muy próximas o muy cerca de los bordes, o entre sí, este parámetro también aumenta cuando se incrementa la frecuencia, sin embargo, aumentar la frecuencia hace que se tenga mayor atenuación de la onda (figura 9). (Rimoldi & Mundo, 2020).

Figura 8

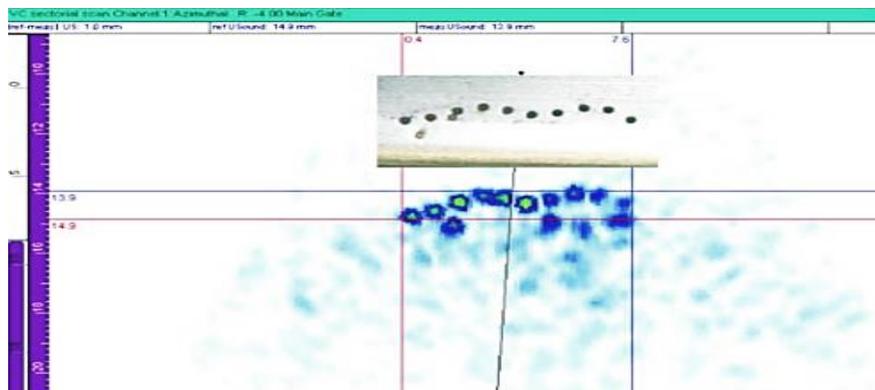
Señal del reflector de referencia antes y después de la calibración de la sensibilidad en la vista A-Scan.



Nota: Imagen tomada de (Olympus, 2015)

Figura 9

Resultados de inspección de barrenos cercanos entre sí.



Nota: *Ejemplo de imagen de resolución lateral de diez (10) perforaciones de 0.5 mm espaciadas 0.5 mm en un gancho de campanario de rotor.*

En la figura 9 se observan los resultados obtenidos del bloque mostrado, el cual tiene diez perforaciones de 5 mm de diámetro y separaciones variables, notando que se ven indicaciones mejor definidas que otras, concluyendo erróneamente que algunos son de mayor severidad o tamaño que otros, ejemplo de un resultado que presenta baja resolución.

2.7 Procedimiento de evaluación de la técnica *phased array ultrasonic*

La evaluación de la sensibilidad y resolución propuesta en el presente trabajo es mediante el uso del bloque patrón diseñado y el planteamiento del procedimiento de la técnica PAUT presentado a continuación. La sensibilidad será evaluada al verificar los daños de menor diámetro, razón por la cual se diseñó *metal dusting*, mediante el daño de erosión con una morfología atípica donde su diámetro y profundidad varían progresivamente se evaluará la

resolución y el daño de cavitación permitirá evaluar tanto la sensibilidad como la resolución al registrar tres perforaciones de distintas dimensiones las cuales serán objeto de comparación entre ellas. Adicionalmente, y contando con el bloque diseñado, se propone un diseño de experimentos que permita evaluar el efecto de cada variable sobre las mediciones y poder determinar su influencia en el porcentaje de error o no, dependencia relacionada con la configuración del mapeo de corrosión en los resultados obtenidos.

El procedimiento elaborado parte de un equipo calibrado siguiendo los requisitos del código ASME sección V artículo 4 y 5 (The American Society of Mechanical Engineers, 2019a) calibrando en su orden respectivo: la velocidad del sonido para ondas longitudinales, el retardo de zapata, sensibilidad ajustando la ganancia de la señal y realizando corrección del tiempo con la distancia mediante curva TCG.

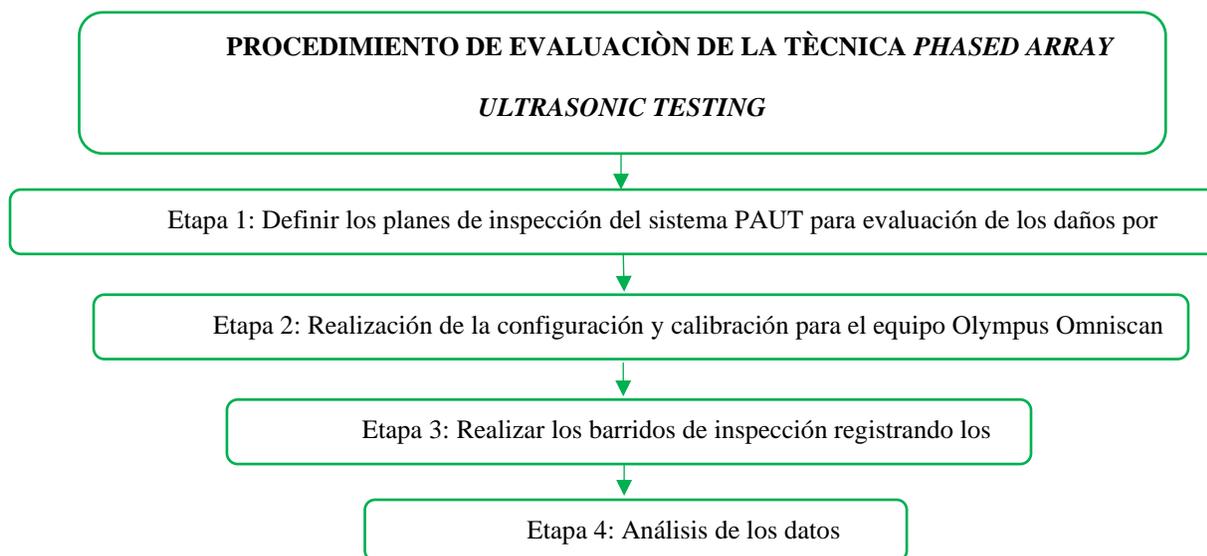
Cada calibración debe realizarse para los diferentes planes de inspección propuestos (tabla 6), teniendo en cuenta el número de elementos activos del transductor, las diferentes profundidades de focalización electrónica de la señal y el salto del elemento según el diseño de experimentos. Una vez se culminado, con el equipo configurado y calibrado se deben a realizar los escaneos a lo largo del bloque, registrando las mediciones de los daños simulados para cada plan de inspección, evaluando cual presenta mejor sensibilidad y resolución. Mediante el análisis estadístico propuesto y con datos experimentales a obtener en un trabajo futuro.

A continuación, se presenta el procedimiento para poder evaluar experimentalmente la sensibilidad y resolución para la detección de daños por corrosión mediante inspección de mapeos de corrosión por la técnica C-scan, para esto, se utilizará el bloque patrón mencionado con anterioridad, el cual deberá ser elaborado conteniendo daños representativos como *metal*

dusting, cavitación y erosión. Teniendo en cuenta el procedimiento experimental propuesto, en las siguientes etapas se presentarán de manera general los pasos a seguir (Figura 10):

Figura 10

Esquema para el desarrollo del procedimiento de evaluación de PAUT.



Etapa 1: Definir los planes de inspección del sistema PAUT para evaluación de los daños por corrosión.

Con el fin de adquirir los datos que permitan estimar la resolución y sensibilidad de los mapeos de corrosión utilizando el equipo mencionado, en la tabla 6, se presenta el diseño de experimentos factorial multinivel planteado, de manera que se evalúan los factores (variables de estudio) más relevantes que están involucrados en la configuración del equipo (tablas 7), manteniendo igual los demás parámetros para todos los barridos, estas son presentadas en la tabla 7. Planteamiento que permitirá determinar estadísticamente el efecto de cada variable de estudio sobre el error en las mediciones realizadas.

Para la realización de dicho estudio, se propone un diseño de experimento factorial multinivel, en el cual se realizará un análisis de varianza para las variables de respuesta (diámetro, espesor y número de daños registrado con PAUT) y un análisis de Pareto (González Razo, 2014) para evaluar cada factor y combinaciones entre ellos, por esto, se recomienda la utilización de un software estadístico de manera que se pueda obtener la significancia estadística de cada factor sobre los resultados, para esto se recomienda el software Stagraphics. Para realizar el análisis, se diseñó un experimento multinivel (Jiménez Ramos et al., 2019), en el que se estudiarán tres factores (variables de estudio): primero el número de elementos activos del transductor, segundo la profundidad de focalización del haz ultrasónico y tercero, el salto del elemento de cada ley focal, los cuales siempre deben ser configurados por el inspector al momento de crear el plan de inspección. En este caso, las variables de respuesta son el diámetro del daño, el espesor mínimo y el número de daños que puedan ser medidos por la técnica PAUT. Con el número de factores y niveles de cada una de las variables, se debe realizar un total de 16 barridos combinando los diferentes niveles, de manera que cada barrido debe cubrir la totalidad del bloque, obteniendo información de los tres mecanismos de daño. La combinación de los factores se presenta en la siguiente tabla 7.

Para evaluar los tres factores de estudio, que tienen diferentes niveles con los diferentes subniveles se necesitará realizar barridos a nivel experimental en el laboratorio sobre el bloque patrón, cada barrido consiste en un plan de inspección que combina los factores y niveles indicados por la combinación aleatoria realizada por el software y presentado en la tabla 6.

Tabla 6

Combinación de los factores por barrido de la técnica PAUT.

Barridos	# de elementos	Salto del elemento	Profundidad de focalización
1	16	2	1
2	16	1	1
3	2	1	0
4	12	1	0
5	2	1	1
6	12	2	1
7	2	2	0
8	6	1	1
9	12	2	0
10	6	2	1
11	2	2	1
12	6	1	0
13	12	1	1
14	16	1	0
15	6	2	0
16	16	2	0

Con la presente propuesta se podrá concluir el efecto que tiene cada variable de estudio o la combinación de dos variables sobre los resultados y se podrá estimar cual variable afecta la exactitud de las variables de respuesta: diámetro, espesor y numero de daños detectables. Finalmente, se podrá cuantificar la sensibilidad determinando aquellas combinaciones que proporcionen mejores y peores resultados determinando cual tiene una mejor y peor sensibilidad. Para evaluar la resolución se observa experimentalmente que los 16 planes de inspección sean capaces de detectar los daños en su totalidad o en cuáles de ellos se detectan en menor número o

con menor o mayor severidad al tomar varios de ellos (daños) como uno solo, aspecto común en la técnica ultrasónica.

Tabla 7

Parámetros variables para la aplicación de la técnica PAUT.

Variables de estudio	Niveles	Valor	Variable de respuesta
Número de elementos	Inferior	2 elementos	<ul style="list-style-type: none"> • Diámetros • Espesor de cada profundidad • Numero de daños detectados
	Intermedio 1	6 elementos	
	Intermedio 2	12 elementos	
	Superior	16 elementos	
Salto del elemento	Inferior	1	
	Superior	2	
Profundidad de focalización	Sin focalizar	1	
	Focalizado	2	

Nota: Datos tomados de (The American Society of Mechanical Engineers, 2019)

Tabla 8

Parámetros fijos para la aplicación de la técnica PAUT en todos los planes de inspección

PARÁMETROS FIJOS			
Resolución de escaneo	0.5 mm	Rango de pantalla	1.2 cm
Frecuencia (PRF)	50 – 200 khz	Velocidad de barrido	Determinada por el equipo
Filtro pasa banda	= Frecuencia del transductor	Voltaje de pulso	Bajo
Amplitud de pulso	1 – 50 mhz	Retardo de zapata	Calibrado desde el equipo
Umbral	20 – 25 %	Resolución de esconder	12 steps/mm

Nota: Datos tomados de.(The American Society of Mechanical Engineers, 2019)

Cada plan de inspección es configurado en el equipo siguiendo el paso a paso, de manera que cada uno tiene una combinación de factores particular basada en el diseño de experimentos.

Etapa 2: Realización de la configuración y calibración para el equipo Olympus Omniscan 1664.

Remitirse al código ASME sección V apéndice IV, donde se muestra la calibración para la técnica PAUT, en la tabla IV-421, “*Manual Linear Phased Array Raster Scanning Examination Procedure Requirements*” (The American Society of Mechanical Engineers, 2019b). Se debe realizar la calibración y configuración del equipo para cada uno de los 16 planes de inspección.

Etapa 3: Realizar los barridos de inspección registrando los daños.

Ubicar el palpador en el extremo izquierdo del primer daño (metal dusting) y deslizar el palpador hacia la derecha hasta el extremo derecho del tercer daño (cavitación) barriendo toda la superficie de la pieza de estudio, verificando que no quedan zonas blancas sin adquisición de datos a lo largo del barrido.

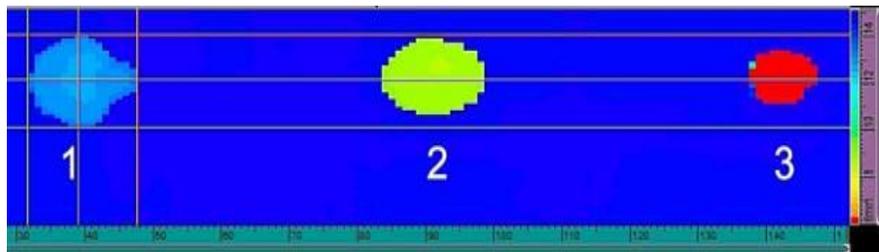
Etapa 4: Análisis de los datos obtenidos.

Se deben registrar los datos obtenidos de diámetros, espesor y números de daños tomados de las datadas del software utilizado ver figura 12. En la figura 11 se observa la representación de un C-scan de tres daños separados con una forma circular, el diámetro de los daños se obtendrá como el valor promedio entre las líneas horizontales y las líneas verticales (cursores de medición) que forman un rectángulo alrededor del daño y el espesor, formado por los cursores de medición que se obtendrá como dato del equipo, el cual dará una lectura registrando el espesor mínimo, el número de daños será el número de indicaciones mostradas en el C-scan, vistas en el

cambio de color de la imagen, las dimensiones registradas se guardarán en la tabla de software estadístico para realizar posteriormente el análisis.

Figura 11

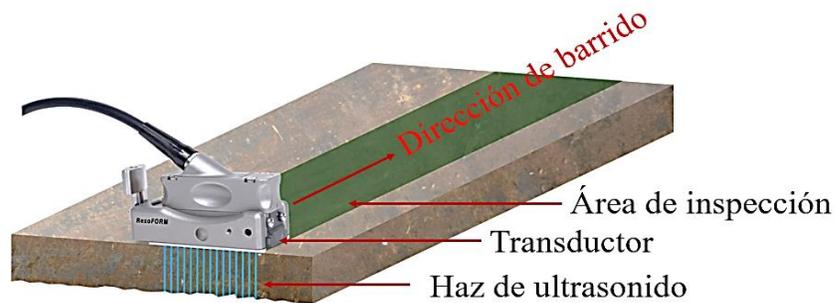
Imagen C-scan de tres daños representativos



Nota: Ejemplo de mediciones realizadas en C-scan

Figura 12

Representación del barrido para PAUT.



Nota: Montaje para el barrido C-scan

Con el desarrollo del presente trabajo se presentan todas las bases para la evaluación experimental a realizar en futuro cuando se facilite el acceso a los laboratorios, lo que permitirá

concluir como la técnica se comporta experimentalmente bajo las condiciones descritas en el presente trabajo de grado y como los resultados varían según lo propuesto anteriormente.

3. Conclusiones

El desarrollo de la presente monografía presenta una metodología que podrá ser fácilmente implementada para evaluar la confiabilidad de la técnica avanzada de inspección de daños por corrosión mediante mapeos C-scan con un diseño de experimentos propuesto y el diseño de un bloque que incluye tres daños de fácil mecanizado con morfología similar a los reales.

A partir de la amplia información consultada fue posible consolidar información relacionada con la morfología, dimensiones y dificultad de inspección con PAUT de manera que fue posible seleccionar los mecanismos de daño de interés para diseñar un bloque patrón que permita realizar mediciones y obtener datos cuantitativos y cualitativos para evaluar la sensibilidad, resolución y porcentaje de error al realizar mediciones sobre erosión, cavitación y metal dusting mecanizados con dimensiones y distribución que permiten en un solo barrido realizar la totalidad de las mediciones.

El bloque patrón fue diseñado a partir de tres mecanismos de daño seleccionados, con la facilidad de ser mecanizados por electroerosión, donde sus dimensiones se ajustaron a cada una de las morfologías propias de cada daño, en Metal dusting se diseñaron seis perforaciones distribuidas a lo ancho del bloque de manera no uniforme para evaluar la resolución, en erosión se diseñó una perforación de múltiples niveles cada uno consecutivo y de diámetros distintos

para evaluar el comportamiento del equipo con un daño de pérdida variable y para cavitación se diseñaron 3 perforaciones de diámetro y profundidades diferentes para evaluar la sensibilidad en la medición de daños.

Se propuso un procedimiento donde se determinará cuantitativamente la resolución y sensibilidad de la técnica PAUT, mediante el uso de un software estadístico (Stagraphics) que permitirá la introducción de unos parámetros de estudio, parámetros fijos y parámetros de respuesta. Los parámetros fijos serán introducidos como base del modelo del software y del procedimiento de la técnica, los parámetros de estudio: número de elementos, salto del elemento, profundidad de focalización, tienen distintos números de niveles, cada uno de estos niveles tendrá un valor propio, de tal manera el software proporcionará una combinación de estos niveles generando cada uno de los planes de inspección, los parámetros de respuesta: diámetro, espesor mínimo y el número de daños que puedan ser detectados, estos cambiarán de acuerdo al cambio y la combinación de los parámetros de estudio, los resultados son analizados, concluyendo cual plan de inspección es el mejor.

4. Recomendaciones

Se recomienda en un futuro proyecto de grado la ejecución y verificación de lo planteado en el presente trabajo, dado que no existió la posibilidad de hacerlo experimentalmente durante este.

La información recopilada en el último objetivo junto a otras posibles investigaciones similares, pudiesen concluir la importancia de cada uno de los parámetros o variables en la realización de una adecuada inspección mediante la técnica PAUT, siendo fundamental el uso adecuado de software estadístico.

Se recomienda el diseño de bloques patrón adicionales con mecanismos de daño diferentes a los incluidos en el presente trabajo.

5. Referencias Bibliográficas

- Alféreza, F., Olaya, J., & Bautista, J. (2018). Síntesis y evaluación de resistencia a la corrosión de recubrimientos de SiO₂-TiO₂-ZrO₂-BiO₂ sobre acero inoxidable 316L producidos por sol-gel. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 195-206.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.bsecv.2018.02.001>
- American Petroleum Institute. (2021). Mecanismos de daño que afectan los equipos en las industrias de refinación. April. Apo Recommended Practice 571.
- A-Star Testing & Inspection. (2020). *Ultrasonic phased array testing*.
<https://www.astartesting.com.sg/pdf/A-STAR-TESTING-INSPECTION-BROCHURE-new.pdf>
- Eddyfi Technologies. (s.f). *Escorpion Inspeccion Ultrasonica*.
<https://www.eddyfi.com/en/product/scorpion-2>
- Galán, C., & Quintero, L. (2021). Caracterización dimensional con ultrasonido por arreglo de fases de discontinuidades inducidas en acero ASTM A36 mediante procesos de electroerosión y soldadura SMAW W. *Revista UIS Ingenierías*, 20(3).
doi:<https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistauisingenierias/article/view/10158>
- González, R. (2014). Herramientas de calidad y el trabajo en equipo para disminuir la reprobación escolar. *Revista Conciencia Tecnológica*, 48, 17–24.

- Jiménez, A., Gómez, S. J., Puerta, J. F., & Jiménez, Y. (2019). . (2019). Diseño de experimento virtual para enfriamiento de tuberías plásticas de cloruro de polivinilo. Ingeniería Energética,.
- Lamarre, A. (2016). *Herramientas ultrasónicas de matriz en fase para inspección de corrosión de alta resolución*. <https://inspectioneering.com/journal/2016-04-28/5305/ultrasonic-phased-array-tools-for--high-resolution-corrosion-ins>
- Lynco, E. (s.f). *Instrumentos de Medicina y control*.
<https://messmedicion.com.ar/producto/eddyfi-lynco/>
- Maquinas y Herramientas. (2017). *¿Qué es un encoder, cuáles son sus tipos y para qué sirven?*
<https://www.demaquinasyherramientas.com/mecanizado/encoder-tipos>
- MayeedulI, s., Thunyaluk, P., Rolf, G., & Brian, K. (2021). Electrochemical investigation into the dynamic mechanism of CO₂ corrosion product film formation on the carbon steel under the water-condensation condition. 390.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.electacta.2021.138880>
- Olympus Corporation. (s.f). *Especificaciones de los equipos de ultrasonidos convencionales*.
<https://www.olympus-ims.com/es/ndt-tutorials/calibration/specifications/>
- Olympus Corporation. (s.f). *Opciones de conectores Phased Array*. <https://www.olympus-ims.com/es/probes/pa/connectors/>
- Olympus Corporation. (s.f). *Bloques de calibración*. <https://www.olympus-ims.com/es/ndt-tutorials/eca-tutorial/probes/calibration/>
- Olympus Corporation. (s.f). *Soluciones para inspeccionar espesores y defectos (fallas)*.
<https://www.olympus-ims.com/es/ndt-instruments/>

Olympus. (s.f.). *Bloques de ensayo para calibración en ensayos no destructivos*.

<https://www.olympus-ims.com/es/ultrasonic-transducers/testblocks/>

Padilla, C., & Guzmán, L. (2019). Análisis De La Resistencia a La Corrosión En Los Recubrimientos 140Mxc-560As, Depositados Con La Técnica De Proyección Térmica Por Arco Eléctrico Mediante Pruebas De Inmersión Y Cámara De Niebla Salina. *Journal of Chemical Unformation and Modeling*, 53(9), 75.

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

Scully, J. (1993). *Corrosion atlas: E. D. D. During*, Elsevier, P.O. Box 330, 1000 AH Amsterdam, 442 pp., loose-leaf pages in 2 vols, Dfl 995, 34, 179.

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. (2019b). *ASME Boiler and Pressure Vessel Code An International Code*. V, 922.

Zhang, Y., Gao, X., Zhao, B., & Ding, H. (2018). *The solution of automatic phased array ultrasonic inspection for railway solid axle*. . International Symposium on Structural Health Monitoring and Nondestructive Testing

