

DESARROLLAR UNA METODOLOGÍA DE INSPECCIÓN DE TUBERÍAS DE  
ACERO UTILIZADAS EN MONTAJES DE CAMPO, BASADA EN LA TÉCNICA DE  
ULTRASONIDO PHASED ARRAY CON EL EQUIPO OMNISCAN MX2

RAMIRO ANDRES DIAZ FORERO  
SERGIO DAVID ROMERO BARON

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
BUCARAMANGA

2020

DESARROLLAR UNA METODOLOGÍA DE INSPECCIÓN DE TUBERÍAS DE  
ACERO UTILIZADAS EN MONTAJES DE CAMPO, BASADA EN LA TÉCNICA DE  
ULTRASONIDO PHASED ARRAY CON EL EQUIPO OMNISCAN MX2

RAMIRO ANDRÉS DÍAZ FORERO  
SERGIO DAVID ROMERO BARÓN

Proyecto de grado para optar al título de Ingeniero Mecánico

Director

HELLER GUILLERMO SÁNCHEZ ACEVEDO  
PhD. Ingeniería Mecánica, Aplicada y Computacional

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
BUCARAMANGA

2020

## **DEDICATORIA**

Dedico este proyecto en primer lugar a Dios por haberme dado la fortaleza necesaria para afrontar las dificultades durante la carrera, a mi familia por su apoyo incondicional y a todos aquellos que hicieron parte y me colaboraron en este proceso.

**RAMIRO ANDRÉS DÍAZ FORERO**

Este proyecto va dedicado Dios por todas sus bendiciones y haberme permitido llegar hasta este punto, por darme fortaleza para seguir adelante y afrontar todas las dificultades que se presentaron, de igual forma a mi familia por la confianza y el apoyo brindado.

**SERGIO DAVID ROMERO BARÓN**

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradecimientos a la UIS por la formación que nos ofreció, por la calidad de profesionales que tiene para formar a los mejores ingenieros del país.

A nuestro director de proyecto el profesor Heller Guillermo Sánchez por su colaboración y apoyo en el desarrollo de este proyecto.

## CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
INTRODUCCIÓN .....	17
1. JUSTIFICACIÓN.....	19
2. OBJETIVOS.....	20
2.1 OBJETIVO GENERAL .....	20
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	20
3. MARCO TEORICO .....	21
3.1 ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS .....	21
3.1.1 Inspección de tuberías de producción del sector petrolero, basada en la técnica de ultrasonido avanzado del equipo phased array; obteniendo resultados en tiempo real. ....	21
3.1.2 Mejora en la calidad de imágenes ultrasónicas aplicando métodos de composición espacial y empleando sistemas de phased array. ....	23
3.1.3. Estudio de integridad estructural mediante ultrasonido Phased Array.....	25
3.1.4. Metodología para la inspección de soldaduras de aceros austeníticos mediante ultrasonido (técnica) Phased Array. ....	26
3.2. REFERENTES TEÓRICOS .....	28
3.2.1 Principios básicos de la acústica .....	28
3.2.2 Características de una onda .....	28
3.2.3 Tipos de ondas .....	29
3.2.4 Impedancia acústica. ....	30
3.2.5 Fenómeno de las ondas.....	31
3.3 ULTRASONIDO .....	32
3.3.1 Principios del ultrasonido. ....	33
3.3.2. Generación del ultrasonido. ....	34

3.3.3 Cristales.....	35
3.3.4 Palpadores o transductores. ....	36
3.3.5 Características de los Palpadores. ....	38
3.4 TIPOS DE FALLAS EN TUBERÍA DE ACERO.....	39
3.4.1. Corrosión en tuberías.....	39
3.4.2 Discontinuidades en soldadura.....	40
4. DISEÑO METODOLÓGICO.....	44
4.1 PRIMERA ETAPA.....	44
4.1.1 Normas para la soldadura.....	44
4.1.2. Recopilación de información primaria. ....	50
4.2. SEGUNDA ETAPA: Caracterización de la pieza de ensayos.....	61
4.2.1 Antecedentes de la tubería usada para la inspección perdida de espesor y corrosión.....	62
4.2.2 Antecedentes de la tubería usada para la inspección de soldadura.....	64
4.3 TERCERA ETAPA: Patrón de calibración.....	64
4.4 CUARTA ETAPA: Determinación de la zona de aplicación de la técnica.....	64
4.5 QUINTA ETAPA: Preparación de la muestra para la aplicación de ultrasonido phased array.....	65
4.6 SEXTA ETAPA: Elaboración de la metodología de aplicación. ....	67
5. PREPARACION DEL EQUIPO OMNISCAN MX2 PARA LA IMPLEMENTACION DE LA SONDA 7.5DL32-REX1-HC DE LA MARCA OLYMPUS, PARA DETECCIÓN DE POROSIDADES Y PERDIDA DE ESPESOR EN TUBERÍA.....	69
5.1 ARCHIVOS DE CONFIGURACIÓN DE LA SONDA 7.5DL32-REX1-HC.....	69
6. METODOLOGÍA DE APLICACIÓN DE LA PRUEBA DE ULTRASONIDO (CORROSION, PERDIDA DE ESPESOR). ....	74
6.1 EQUIPOS REQUERIDOS PARA LAS PRUEBAS.....	74
6.2 PIEZAS DE INSPECCION (1 Y 2). ....	75
6.3 INSUMOS DE APLICACIÓN.....	77
6.4 PASOS PARA LA CALIBRACIÓN DE LA SONDA DE CORROSIÓN Y PERDIDA DE ESPESOR.....	78

7. CONFIGURACION VERSAMOUSE PARA INSPECCION DE ESPESORES.	103
7.1 MONTAJE DEL VERSAMOUSE.....	104
7.2 PASOS PARA LA CONFIGURACIÓN DEL EQUIPO VERSAMOUSE (PERDIDA DE ESPESOR Y CORROSIÓN).....	107
8. RESULTADOS.....	115
8.1 PERDIDA DE ESPESOR.....	115
8.2 POROSIDAD .....	117
8.3 SOLDADURA.....	121
9. CONCLUSIONES .....	134
10. RECOMENDACIONES.....	135
BIBLIOGRAFÍA.....	136

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Características de una onda .....	29
Figura 2. Reflexión.....	31
Figura 3. Refracción.....	32
Figura 4. Palpador dual y Dual Linear Array Probe Olympus .....	38
Figura 5. Corrosión de Oleoductos .....	39
Figura 6. Fisura Longitudinal .....	40
Figura 7. Fisura Transversal .....	41
Figura 8. Discontinuidad por falta de fusión.....	41
Figura 9. Falta de Penetración.....	42
Figura 10. Porosidad superficial.....	42
Figura 11. Imperfecciones de soldadura.....	43
Figura 12. Bloque de referencia ASTM IWW de Olympus .....	51
Figura 13. Velocidad de propagación del sonido onda longitudinal y transversal ..	52
Figura 14. Omniscan MX2. ....	52
Figura 15. Dual Linear Array Probe .....	53
Figura 16. Equipo VersaMOUSE .....	54
Figura 17. Sonda 5L16 A10 De Olympus .....	56
Figura 18. Dimensiones cuña Angular .....	57
Figura 19. Cuña Angular SA10 N55S .....	57
Figura 20. Sonda y cuña angular ensambladas.....	57
Figura 21. Representación de los datos en el equipo Omniscan.....	58
Figura 22. Vista A-scan.....	59
Figura 23. Tubo con pérdida de espesor .....	59
Figura 24. Resultados en representación C-scan.....	60

Figura 25. Bloque de calibración y palpador angular .....	60
Figura 26. Vista S-scan.....	61
Figura 27. Representación Ray Tracing .....	61
Figura 28. Tubería N°1. Para análisis de pérdida de espesor .....	65
Figura 29. Tubo N°1. Preparado para la inspección .....	65
Figura 30. Zona interna del tubo N°1 .....	66
Figura 31. Tubería N°2 para análisis de porosidades .....	66
Figura 32. Tubería N°2 preparada para la inspección .....	66
Figura 33. Zona interna del tubo N°2 .....	67
Figura 34. Tubo para inspección de soldadura .....	67
Figura 35. Memoria SD Omniscan MX2 .....	70
Figura 36. Memoria de la sonda-Corrosión.....	70
Figura 37. Archivos memoria corrosión .....	70
Figura 38. Ejecutable software corrosión.....	71
Figura 39. Instalación de archivos .....	71
Figura 40. Iniciar la instalación.....	72
Figura 41. Configuración del inicio del omniscan mx2 .....	73
Figura 42. Archivo DLA MX2PA1_3.....	73
Figura 43. Sonda .....	74
Figura 44. VersaMOUSE .....	74
Figura 45. Equipo Omniscan MX2 .....	75
Figura 46. Pieza para inspección de espesores .....	75
Figura 47. Pieza para inspección de porosidades .....	76
Figura 48. Bloque de calibración IIW. Modificado .....	76
Figura 49. Gel acoplante.....	77
Figura 50. Interfaz inicial equipo de ultrasonido.....	78
Figura 51. Archivo de Inspección.....	79
Figura 52. Menú para guardar archivos. ....	80
Figura 53. Interfaz para el inicio de la configuración.....	80
Figura 54. Interfaz para el inicio de la configuración.....	81

Figura 55. Interfaz para el inicio de la calibración de sensibilidad. ....	82
Figura 56. Submenú TIPO. ....	82
Figura 57. Submenú MODO .....	83
Figura 58. Submenú APLICAR A.....	84
Figura 59. Amplitud de referencia. ....	85
Figura 60. Ajustar sección calibración .....	85
Figura 61. Ajustar puerta A en eco A. ....	86
Figura 62. Posicionamiento de la sonda .....	87
Figura 63. Ajuste de ganancia y compensación.....	88
Figura 64. Sonda sobre el bloque de calibración .....	88
Figura 65. Envolvente para calibración de sensibilidad. ....	89
Figura 66. Interfaz para el inicio de la calibración de velocidad .....	90
Figura 67. Submenú TIPO. ....	90
Figura 68. Submenú MODO .....	91
Figura 69. Tipo de eco. ....	91
Figura 70. A- scan.....	92
Figura 71. Posicionamiento de suela. ....	93
Figura 72. Eco profundidad 1.....	93
Figura 73. Eco profundidad 2.....	94
Figura 74. Velocidad de inspección .....	94
Figura 75. Interfaz para el inicio de la calibración de retardo de suela .....	95
Figura 76. Submenú TIPO. ....	96
Figura 77. Submenú MODO .....	96
Figura 78. Submenú APLICAR A.....	97
Figura 79. Inicio de calibración retardo de suela.....	97
Figura 80. Menú para ajuste de profundidad A. ....	98
Figura 81. Ajustar sección retardo de suela.....	99
Figura 82. Ajustar puerta A en profundidad A .....	100
Figura 83. Posicionamiento de la sonda retardo de suela. ....	100
Figura 84. Calibrar y aceptar retardo de suela.....	101

Figura 85. Resultado de la calibración.....	102
Figura 86. Escáner VersaMOUSE. ....	103
Figura 87. Cable codificado .....	104
Figura 88. Yugo PA ajustable .....	104
Figura 89. Punto de conexión Omniscan MX2.....	105
Figura 90. Conexión cable codificador – Omniscan MX2 .....	105
Figura 91. Punto de conexión escáner VersaMOUSE .....	106
Figura 92. Conexión cable codificador – Escáner VersaMOUSE .....	106
Figura 93. Montaje VersaMOUSE-yugo PA ajustable-sonda.....	107
Figura 94. Menú desplegable ventana archivo .....	108
Figura 95. Interfaz para el inicio de la configuración del VersaMOUSE.....	108
Figura 96. Sub menú codificador 1 .....	109
Figura 97. Sub menú codificador 2 .....	110
Figura 98. Ajuste área pieza 1 .....	111
Figura 99 Ajuste área pieza 2 .....	112
Figura 100. Visualización A-C-S SCAN .....	113
Figura 101. Posicionamiento del VersaMOUSE .....	113
Figura 102. Posicionamiento de la sonda .....	114
Figura 103. Resultados de inspección de espesor Tubería API 5L X42. ....	116
Figura 104. Tubo para inspección de espesor Tubería API 5L X42.....	117
Figura 105. Resultados de inspección de corrosión Tubería API 5L X42. ....	118
Figura 106. Primer tramo .....	119
Figura 107. Segundo tramo .....	119
Figura 108. Tercer tramo .....	120
Figura 109. Tubo para inspección de corrosión Tubería API 5L X42.....	121
Figura 110. Tubería de inspección de soldadura punto 1. ....	122
Figura 111. Vistas resultados discontinuidad N°1 .....	123
Figura 112. Maxima amplitud.....	123
Figura 113. 6 dB a la izquierda. ....	124
Figura 114. 6 dB a la derecha.....	124

Figura 115. Tubería de inspección de soldadura punto 2. ....	126
Figura 116. Vistas resultados discontinuidad N°2.....	127
Figura 117. Máxima amplitud.....	128
Figura 118. 6 dB a la izquierda .....	128
Figura 119. 6 dB a la derecha.....	129
Figura 120. Tubería de inspección de soldadura punto 3. ....	131
Figura 121. Vistas de resultados discontinuidad N°3.....	131

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Criterios de aceptación o rechazo de la prueba ultrasónica.....	46
Tabla 2. Nivel de barrido para inspección de soldadura .....	46
Tabla 3. Especificaciones y dimensiones de la sonda para inspección de soldadura .....	55
Tabla 4. Especificaciones y dimensiones de la cuña para inspección de soldadura .....	56
Tabla 5. Datos Técnicos Línea de transferencia DN-DC .....	63
Tabla 6. Resultados discontinuidad N° 1 .....	122
Tabla 7. Longitud de la discontinuidad N°1.....	125
Tabla 8. Resultados discontinuidad N°2 .....	127
Tabla 9. Longitud de la discontinuidad N°2.....	129
Tabla 10. Resultados discontinuidad N°3 .....	131
Tabla 11. Longitud de la discontinuidad N°3.....	132

## **LISTA DE ANEXOS**

**“Ver anexos adjuntos en el CD y pueden visualizar en la base de datos de la  
Biblioteca UIS”**

ANEXO A. Metodología para inspección de espesores y corrosión

ANEXO B. Metodología para inspección de soldadura

ANEXO C. Configuración de VersaMOUSE para inspección de tuberías

## RESUMEN

**TÍTULO:** DESARROLLAR UNA METODOLOGÍA DE INSPECCION DE TUBERIAS DE ACERO UTILIZADAS EN MONTAJES DE CAMPO, BASADA EN LA TECNICA DE ULTRASONIDO PHASED ARRAY CON EL EQUIPO OMNISCAN MX2\*

**AUTORES:** RAMIRO ANDRES DIAZ FORERO, SERGIO DAVID ROMERO BARON\*\*

**PALABRAS CLAVES:** Ultrasonido Phased Array, Omniscan MX2, inspección de soldadura, inspección de espesores, inspección de corrosión, detección de fallas, sondas, suelas, versaMOUSE.

### DESCRIPCIÓN:

El presente proyecto tiene como objetivo establecer una metodología para la inspección de fallas en tubería empleada en la industria que permita a los estudiantes del programa de ingeniería mecánica de la universidad Industrial de Santander aplicar la técnica de ultrasonido phased array utilizando los equipos presentes en el laboratorio de vibraciones.

Para el desarrollo de la metodología se empleó el escáner Omniscan MX2 equipo con la capacidad para realizar ensayos mediante la técnica phased array, equipado con la sonda de Olympus 7.5 DL32-REX1-HC de 32 elementos y un software de inspección especializado para la inspección de corrosión en tuberías, además de una sonda SA10-N55S. de 64 elementos de ondas transversales, así como de un escáner que guarda la posición de desplazamiento de la sonda equipada (VersaMouse) y recolecta datos de inspección en mapeos 2D. Para la calibración del equipo se cuenta con patrones de calibración V1 de materiales API 5Lx42. Para la aplicación de la metodología se emplearon 2 tramos de tubería API 5Lx42 utilizada en el transporte de hidrocarburos y que nos fue donada por el instituto colombiano de petróleos.

Se presentan los resultados obtenidos al aplicar la metodología tanto para inspección de soldadura, pérdida de espesor y corrosión, se caracterizan algunas de las fallas encontradas para cada tipo de inspección y por último se dejan presentar las recomendaciones finales para la inspección en campo por el método de ultrasonido phased array.

---

\* Trabajo de grado

\*\* Facultad de ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de ingeniería Mecánica. Director: Heller Guillermo Sánchez Acevedo. PhD En Ingeniería Mecánica, Aplicada y Computacional

## ABSTRACT

**TITLE:** DEVELOP A METHODOLOGY FOR THE INSPECTION OF STEEL PIPES USED IN FIELD ASSEMBLIES, BASED ON THE ULTRASOUND PHASE ARRAY TECHNIQUE WITH THE OMNISCAN MX2 EQUIPMENT \*

**AUTHORS:** RAMIRO ANDRES DIAZ FORERO, SERGIO DAVID ROMERO BARÓN \*\*

**KEYWORDS:** Ultrasonic Phased Array, Omniscan MX2, welding inspection, thickness inspection, corrosion inspection, fault detection, probes, soles, versaMOUSE

### **DESCRIPTION:**

The objective of this project is to establish a methodology for the inspection of pipeline failures used in the industry that allows students of the mechanical engineering program of the Industrial University of Santander to apply the phased array ultrasound technique using the equipment present in the laboratory.

For the development of the methodology, the Omniscan MX2 scanner equipment with the ability to carry out tests using the phased array technique, equipped with the Olympus 7.5 DL32-REX1-HC 32-element probe and specialized inspection software for the inspection of Corrosion in pipes, in addition to a SA10-N55S probe. 64 transverse wave elements, as well as a scanner that stores the displacement position of the equipped probe (VersaMouse) and collects inspection data in 2D mappings. For the calibration of the equipment, calibration standards V1 of API 5Lx42 materials are available. For the application of the methodology, were used 2 sections of API 5Lx42 pipe, used in the transport of hydrocarbons and which were donated to us by the Colombian Petroleum Institute

The results obtained by applying the methodology for both weld inspection, loss of thickness and corrosion are presented, some of the failures found for each type of inspection are characterized and finally the final recommendations for field inspection by the method are presented phased array ultrasound.

---

\* Bachelor Thesis

\*\* Faculty of Mechanical and Mechanical Engineering. School of Mechanical Engineering. Director Heller Guillermo Sánchez Acevedo. PhD in Mechanical. Applied and Computational Engineering.

## INTRODUCCIÓN

Existen en la actualidad una gran cantidad de técnicas para la detección de fallas en la Industria, las cuales cada día son más avanzadas gracias al desarrollo de nuevas tecnologías para este campo. Dentro de las técnicas se encuentran los ensayos no destructivos, los cuales se usan en una gran variedad de ramas tales como: industria automotriz, aviación, plantas generadoras, construcción y manufactura.

Los ensayos no destructivos utilizan una serie de métodos y técnicas que no alteran de forma permanente las propiedades físicas, químicas o dimensionales de los materiales a los que se les aplica; Pueden ser análisis de vibraciones, análisis de ruido, análisis de aceite, inspección por líquidos penetrantes, corrientes inducidas, radiografía, termografía e inspección por ultrasonido phased array.

La inspección por ultrasonido phased array es una técnica de inspección computarizada que posee una alta probabilidad de detección de fallas y alta precisión en la evaluación de defectos. Su funcionamiento es similar al ultrasonido convencional, a diferencia que se pueden controlar parámetros tales como Angulo de refracción, punto de salida del haz y enfoque en una zona determinada.

La realización del proyecto consta de determinar una metodología para aplicar la técnica de ultrasonido phased array para la detección temprana de fallas en tuberías de acero usadas en la industria, para lo cual es necesario determinar el tipo de material de la tubería en primera estancia. Una vez determinado el material se procede a realizar un patrón de calibración, el cual es usado para el ajuste del equipo OMNISCAN MX2 que realiza el ultrasonido. Para la detección de cada tipo de falla es necesario realizar una metodología que permita establecer el protocolo de inspección adecuado. Para esto se realizan diversas mediciones para determinar

el modo que mejor se ajuste en la obtención de cada tipo de falla a analizar:  
porosidades, pérdida de espesor por corrosión y discontinuidades por soldadura.

## 1. JUSTIFICACIÓN

El presente trabajo se enfocará en estudiar la detección de fallas presentes en equipos y elementos industriales. Para este proceso se aplicará el método de inspección por ultrasonido phased array. La técnica de ultrasonido phased array es flexible y confiable y puede ser implementada en gran variedad de aplicaciones. Un ejemplo es el diagnóstico temprano de irregularidades en elementos y equipos industriales, esto la hace una técnica ampliamente utilizada en labores de mantenimiento preventivo y control de calidad de los procesos. Este trabajo permitirá desarrollar una metodología para la detección de fallas tales como fisuras, porosidades, pérdida de espesor por corrosión, discontinuidades por soldadura en tuberías de acero utilizadas en la industria.

Con el desarrollo de la metodología se busca brindar al estudiante el conocimiento básico y necesario para aplicar la detección de fallas por ultrasonido phased array en elementos industriales. Para esto se va a utilizar tubería de acero usada en la industria petrolera a la cual se le van a realizar pruebas de ultrasonido en el laboratorio de vibraciones mecánicas ubicado en la escuela de ingeniería mecánica de la Universidad Industrial de Santander.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GENERAL**

- Establecer una metodología para la elaboración de procedimientos de inspección para la detección de fallas tipo: porosidades, pérdida de espesor por corrosión y discontinuidades por soldadura en piezas de tuberías de acero (empleadas en montajes industriales) aplicando la técnica de ultrasonido phased array.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Describir el proceso metodológico para la implementación de la técnica de ultrasonido phased array para identificar fallas tipo: porosidades, pérdida de espesor por corrosión, discontinuidades por soldadura en dos piezas de tuberías de acero (empleadas en montajes industriales) a escala de laboratorio.
  1. Material de la tubería por medio de ensayo espectroscopia de chispa.
  2. Elaborar patrón de calibración.
  3. Calibrar el equipo OMNISCAN MX2.
- Inspeccionar, a través de la técnica de ultrasonido phased array para identificar las fallas tipo: porosidades, pérdida de espesor por corrosión y discontinuidades por soldadura, dos piezas de tuberías de acero (empleadas en montajes industriales) montadas como banco de pruebas de laboratorio.
- Elaborar el manual de ensayo para la aplicación de la metodología de inspección de fallas usando la técnica phased array en piezas de tubería de acero.

### 3. MARCO TEORICO

Para el desarrollo de la investigación se presentarán primero los antecedentes investigativos, es decir los proyectos que se han desarrollado acerca de la aplicación de ultrasonido en equipos industriales haciendo énfasis en tuberías, los cuales darán las bases y servirán de guía en los temas a tratar. Posteriormente se muestran los referentes teóricos los cuales son la recopilación de los conocimientos científicos existentes sobre el tema que servirán para el desarrollo y culminación del proyecto.

#### 3.1 ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS

Es muy importante conocer y resaltar investigaciones relacionadas con la aplicación de ultrasonido en la industrial, que se han desarrollado en otras regiones, en la nación o a nivel internacional, con el objetivo de aprender acerca de sus resultados y así poder elaborar un proyecto más completo.

**3.1.1 Inspección de tuberías de producción del sector petrolero, basada en la técnica de ultrasonido avanzado del equipo phased array; obteniendo resultados en tiempo real.**<sup>1</sup> Este proyecto se desarrolló en la Universidad Industrial de Santander en Bucaramanga.

---

<sup>1</sup> VERA OVIEDO, L.; CIFUENTES BLANCO, M. Inspección de tuberías de producción del sector petrolero, basada en la técnica de ultrasonido avanzado del equipo phased array; obteniendo resultados en tiempo real. Trabajo de pregrado Universidad Industrial de Santander, Ciudad, Bucaramanga. Junio de 2018. [En línea]. [Revisado 5 de mayo de 2019]. Disponible en Biblioteca virtual UIS, <http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2018/172833.pdf>

En el proyecto se destaca el gran potencial que poseen los estudiantes de ingeniería de petróleos para emplear tecnologías que brindan una ayuda a la hora de realizar inspección de tuberías implementadas en campos industriales; Esto se debe en parte al interés de los estudiantes acerca de la extracción de hidrocarburos y demás usos que se obtienen de la tuberías como en el caso de oleoductos, sistemas de refrigeración, acueductos..., además se hizo énfasis en el desarrollo académico y profesional que se puede alcanzar ya que estos elementos componen un importante campo de acción de los ingenieros mecánicos. Se realizó el ensayo sobre las diferentes muestras que tenían con el fin de determinar las características individuales de cada una de estas.

Realizaron la inspección por ultrasonido en cada uno de los tramos de tubería obtenidas del mismo material (acero al carbono-N80) con el equipo de ultrasonido del laboratorio de ensayos no destructivos (END) de la Universidad Industrial de Santander, con la finalidad de estudiar las diversas fallas presentes e ir obteniendo resultados de cada una de estas en tiempo real.

Del ensayo que se realizó sobre cada una de las muestras de tubería se concluyó que estas no se encontraban en óptimas condiciones para ser empleadas nuevamente en producción dado la pérdida de espesor continua que presentaron y quedando fuera del parámetro límite establecido por la norma ASME B31 que es del 12%, este tipo de inspección nos permite determinar en qué momento es óptimo el reemplazo de tramos de tubería con el fin de evitar daños por fallo de la misma o la correcta implementación de un plan de mantenimiento preventivo que lleve el registro de cada una de estas inspecciones y determine el momento en el cual deba ser sustituida esta tubería, en otros casos nos permite saber si una tubería está en condiciones de volver a ser empleada en campo, claro está, que no basta esta técnica para determinar si puede ser implementada nuevamente, se aplican otros ensayos para concluir esto.

Del proyecto se puede resaltar la importancia de la aplicación de ensayos no destructivos en la industria, de un proceso de mejora continua que permita ir creciendo y perfeccionando la técnica, que de su correcta y apropiada implementación en equipos industriales se obtienen resultados confiables en cuando al estado actual de la tubería, es un método que permite su implementación en cualquier tipo de metal por lo que puede ser implementado en tanques, estructuras, recipientes a presión..., es importante resaltar el beneficio económico que se obtiene de la implementación de esta técnica ya que permite estudiar un tramo de tubería que está siendo usada y ayudar a determinar si esta puede continuar o no en funcionamiento y así evitar daños en la infraestructura, en el ambiente, o el personal de la empresa.

Por ultimo cabe resaltar que para la debida implementación de la técnica se debe contar con personal altamente calificado en ultrasonido para evitar conclusiones o resultados erróneos.

**3.1.2 Mejora en la calidad de imágenes ultrasónicas aplicando métodos de composición espacial y empleando sistemas de phased array.**<sup>2</sup> Este Trabajo se desarrolló en el Departamento de Ensayos no Destructivos y Estructurales de la CNEA, financiado con el apoyo de la CNEA, el Instituto Sábató y de la ANPCyT bajo el marco del proyecto de investigación PICT-2014-1768 ; en el trabajo se resaltó la importancia del análisis de las tuberías por ultrasonido phased array con el fin de determinar las fallas que están presentan durante su uso tal como lo son las porosidades por soldadura, fisuras y perdidas de espesor por ultrasonido y los efectos que estos producen sobre la vida útil del elemento.

---

<sup>2</sup> QUIROS, Dante Patricio; BRIZUELA, José; DESIMONE, Carlos y DANERI, Silvana. Mejora en la calidad de imágenes ultrasónicas aplicando métodos de composición espacial y empleando sistemas de Phased Array. *Matéria* (Rio J.) [online]. 2018, vol.23, n.2 [citado 2019-05-21], 12121. Disponible en: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S151770762018000200530&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S151770762018000200530&lng=en&nrm=iso)>. Publicación electrónica Julio 19, 2018. ISSN 1517-7076. <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620180002.0455>.

El objetivo principal de este trabajo es lograr una mejor interpretación de las imágenes obtenidas por ultrasonido usando técnicas phased array.

Su metodología consistió en realizar varias imágenes desde diferentes posiciones y luego interpolando las imágenes mediante el algoritmo que propusieron obtuvieron una imagen final de mejor relación señal-ruido y mayor contraste que las imágenes individuales.

De este proyecto se puede resaltar la importancia de la composición espacial y coherente de múltiples imágenes que han demostrado que tienen gran potencial de aplicación en los equipos industriales, ya que mejora la detección de defectos y aumenta el potencial de la información que proporciona la tecnología de Phased Array.

La correcta utilización del equipo de ultrasonido phased array sumado a las posibilidades brindadas por el algoritmo de interpolación, permiten obtener y combinar toda información adquirida con distintas orientaciones y posiciones en una única imagen, permitiendo detectar y evaluar defectos, aun cuando estos poseen una orientación o distribución geométrica compleja.

A su vez la posibilidad de concentrar la información mediante la superposición de imágenes sobre la zona de interés permite mejorar la relación señal-ruido y realzar el contraste de la imagen, debido a que mientras la intensidad de los reflectores (como ser fisuras, defectos, cambios de fase) se mantiene toma a toma, el ruido mantiene su aleatoriedad. Por tanto, se logra una disminuir el ruido de fondo en el valor final promediado, obteniendo así una imagen de calidad superior y precisa.

### **3.1.3. Estudio de integridad estructural mediante ultrasonido Phased Array<sup>3</sup>.**

Este proyecto fue realizado en la universidad de Bío-bío, Concepción Chile. El objetivo fue diseñar un protocolo de inspección por ultrasonido Phased Array basados en las normas que determinan la integridad estructural de sistemas mecánicos, específicamente de uniones soldadas. Para este proyecto se usó el equipo Olympus EPOCH 1000i para la inspección y evaluación de discontinuidades.

Los estudios realizados en este proyecto fueron hechos sobre probetas con fallas inducidas para determinar si era eficaz los métodos que diseñaron. Los métodos aplicados en este proyecto estaban basados en normas para ensayos no destructivos por medio de ultrasonido en estudio de integridad estructural, teniendo en cuenta las entidades encargadas de la estandarización a nivel internacional como lo son la ASME (American Society of Mechanical Engineers), AWS (American Welding Society) y API (American Petroleum Institute). El proyecto utilizó los requisitos estipulados en el código AWS D1.1, artículo 6.22 el cual menciona las capacidades que debe tener el equipo de ultrasonido para realizar las inspecciones en soldaduras.

Aplicando la normativa (AWS D1.1) determinaron los pasos a seguir para realizar la inspección teniendo en cuenta la delimitación de la zona de barrido. Después para la calibración del equipo se debe contar con un bloque de calibración el cual debe ser del mismo material que la pieza a inspeccionar. Utilizaron la herramienta de software AWS en el equipo. Una vez hicieron las inspecciones en las probetas analizaron los datos obtenidos en las tablas de criterio de aceptación o rechazo para ultrasonido en soldaduras basados en la norma AWS. Finalmente aplicaron el método a las probetas y a un recolector de aire de un compresor industrial para la validación de la técnica, encontrando resultados satisfactorios.

---

<sup>3</sup> MARINO RIVERA, José Pablo. Estudio de integridad estructural mediante ultrasonido Phased Array. Informe de habilitación profesional, Universidad del Bío-bío. Concepción, Chile. 2014. [En línea]. [Revisado 5 de mayo de 2019]. Disponible en red de bibliotecas: [http://repobib.ubiobio.cl/jspui/bitstream/123456789/334/1/Marino\\_Rivera\\_Jose\\_Pablo.pdf](http://repobib.ubiobio.cl/jspui/bitstream/123456789/334/1/Marino_Rivera_Jose_Pablo.pdf)

**3.1.4. Metodología para la inspección de soldaduras de aceros austeníticos mediante ultrasonido (técnica) Phased Array.**<sup>4</sup> Este proyecto fue realizado en la Universidad libre de Bogotá Colombia. Su objetivo era establecer una metodología para la elaboración de procedimientos de inspección mediante ultrasonido Phased Array de soldaduras de aceros austeníticos. En el proyecto se resalta que existe una dificultad para realizar la inspección sobre las soldaduras en aceros austeníticos debido a la geometría interna caracterizada por la dispersión altamente heterogéneo de la estructura de estos materiales, lo cual dificulta los procesos que normalmente se aplican para la inspección en estos materiales.

El proyecto resalta que gracias al estudio y desarrollo de nuevos transductores y técnicas se han logrado disminuir los errores de localización, dimensionamiento y caracterización de discontinuidades. El desarrollo de tres campos ha abierto la posibilidad de superar las dificultades en la inspección de soldaduras austeníticas: la cuantificación micro estructural, modelos y tecnología de ultrasonido de arreglo de fases.

Para la realización del proyecto se tuvo en cuenta la normatividad:

ASME Section V. Nondestructive examination, Article 4-2013. Ultrasonic examination methods for welds. Emitida por la asociación Americana de Ingenieros Mecánicos. Esta norma establece los requisitos para el desarrollo de procedimientos de exámenes de soldadura mediante técnicas de ultrasonido empleadas en el dimensionamiento de indicaciones y posterior comparación con estándares de aceptación.

---

<sup>4</sup> FUQUEN SANABRIA, Oscar Miguel. Metodología para la inspección de soldaduras de aceros austeníticos mediante ultrasonido (técnica) Phased Array. Proyecto de posgrado. Especialización en soldadura. Universidad Libre. Bogotá, Colombia. Agosto de 2014. [En línea]. [Revisado 5 de mayo de 2019]. Disponible en: <https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/9857/Trabajo%20Final%20de%20Grado.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

ASTM E-2700-2009. Standard Practice for Contact Ultrasonic Testing of Welds Using Phased Arrays. Esta norma describe las técnicas para inspección por ultrasonido de soldaduras utilizando el Phased Array de haz angular en presentación S-scan o E-scan.

ASTM E-2491-2006. Standard Guide for Evaluating Performance Characteristics of Phased Array Ultrasonic Examination Instruments and Systems. Esta norma evalúa las características de desempeño de los equipos para mantener la confiabilidad del funcionamiento adecuado entre palpadores e instrumentos.

Cada componente usado en el equipo de ultrasonido Phased Array cumple un papel fundamental en el proceso de inspección, se debe tener en cuenta que cada uno de estos debe ser calibrado y ajustado antes de su utilización, para realizar una inspección adecuada se deben revisar los parámetros:

- Ultrasonido: dependen del material a inspeccionar
- Transmisión directa o indirecta del haz de ultrasonido: el cual puede ser directo desde el palpador o a través de la zapata
- Parámetro de arreglo de fases.
- simulación de las leyes focales para lograr la cobertura total de la soldadura a inspeccionar
- Evaluación del haz en el cual se evalúa la señal, la resolución lateral y la intensidad del haz necesaria para recorrer el rango de inspección.

Todo lo anteriormente mencionado se tuvo en cuenta antes de realizar la inspección al elemento soldado.

## 3.2. REFERENTES TEÓRICOS

**3.2.1 Principios básicos de la acústica**<sup>5</sup> Si tomamos un sólido y se le aplica una perturbación, se produce una agitación en sus moléculas que se propaga por el sólido, a este fenómeno se le conoce como onda. Este tipo de onda puede ser provocado en cualquier medio que sea elástico, es decir que cumpla con la ley de Hooke.

Ondas mecánicas: requiere de un medio para propagarse, tal como un metal, el aire o el agua. El sonido es un ejemplo de este tipo de ondas y pueden propagarse en un medio sólido, líquido o gaseoso.

### 3.2.2 Características de una onda

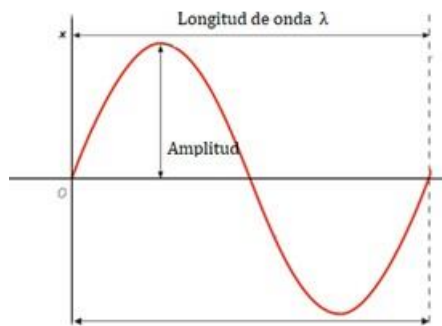
- **Onda:** Es una propagación de una oscilación y sucede cuando las partículas de un material oscilan transmitiendo su vibración a la adyacente.
- **Longitud de onda ( $\lambda$ ):** es la distancia entre dos puntos de una onda que se encuentra en el mismo estado de movimiento.
- **Periodo (T):** es el tiempo en segundos que tarde en realizarse una oscilación completa.
- **Frecuencia:** es el número de oscilaciones de una partícula por segundo. Su unidad es el Hertz (Hz).  $f = \frac{1}{T}$
- **Velocidad de propagación:** depende del medio en el cual se propaga la onda, la velocidad se determina:  $v = \frac{\lambda}{T}$
- **Amortiguación:** es el decrecimiento de la amplitud de la onda en el tiempo.

---

<sup>5</sup> TIPPENS, P. Física, conceptos y aplicaciones (7 ed.; A.C. Gonzales y Universidad Nacional Autónoma de México, trads.). México: Mc Graw Hill. 2007

- **Oscilación (ciclos):** Es el cambio periódico de la condición o el comportamiento de un cuerpo.
- **Amplitud (A):** Es la máxima desviación de oscilación, si esta es constante en el tiempo la oscilación se considera como des amortiguada (para materiales perfectamente elásticos), en cambio si esta decrece con el tiempo, la oscilación se considera como amortiguada, en este caso la disminución de dicha amplitud se debe a la disipación de energía (cuando los materiales no son perfectamente elásticos).<sup>6</sup> Véase figura 1.

**Figura 1. Características de una onda**



### 3.2.3 Tipos de ondas

- **Ondas longitudinales:** su movimiento en el medio es paralelo a la dirección de propagación. Ejemplo la propagación del sonido. Pueden propagarse en medios sólidos, líquidos y gaseosos.

<sup>6</sup> HEWITT, P. Física Conceptual (10. Ed; V.A Flores, trad) México: Pearson education. 2007

- **Ondas transversales:** el movimiento de las partículas es perpendicular a la dirección de la onda. Ejemplo el movimiento de una soga al agitarla. Se propagan en medios sólidos.
- **Ondas superficiales:** son ondas que se propagan en superficies de sólidos con espesores gruesos penetrando aproximadamente una longitud de onda. Es una combinación de ondas transversales y longitudinales formando una elipse. Se utilizan para determinar defectos superficiales.
- **Ondas LAMB:** aparecen en cuerpos cuyo espesor es del mismo orden que una longitud de onda, ejemplo en chapas delgadas. El movimiento de las partículas es similar al movimiento elíptico, generando dos modos de vibración: modo simétrico (moviéndose paralelas a la superficie respecto al plano medio) y el anti simétrico o flexional (el mayor movimiento de las partículas es perpendicular a la superficie).
- **Propagación del sonido:** El sonido se propaga en forma de ondas, en un medio ya sea sólido, líquido o gaseoso. Pero estos medios imponen una resistencia a la propagación de la onda, lo que se conoce como impedancia acústica.

**3.2.4 Impedancia acústica.** La impedancia acústica se determina como el producto de la densidad del medio por la velocidad de propagación de la onda. Por lo tanto, un medio que posea baja impedancia acústica tendrá baja resistencia a las deformaciones elásticas producto de las ondas sonoras.

$$\text{Impedancia: } Z = \rho * V$$

*$\rho$ : densidad del material*

*$V$ : velocidad de propagación en el medio.*

- **Velocidad de propagación:**

Longitudinal:

$$V = \frac{E}{\rho}$$

**Donde:**

*E: Modulo de elasticidad o de Young.*

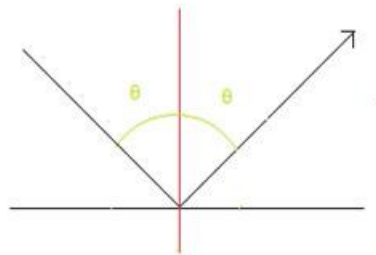
*$\rho$ : Densidad del material*

Se determina que la velocidad del sonido no depende de la amplitud ni de la frecuencia, sino del medio en que se propaga.

**3.2.5 Fenómeno de las ondas.** Las ondas presentan diversos fenómenos de propagación cuando pasan de un medio a otro, por lo que es importante detallar algunos de ellos que nos permitan interpretar el comportamiento del haz ultrasónico.

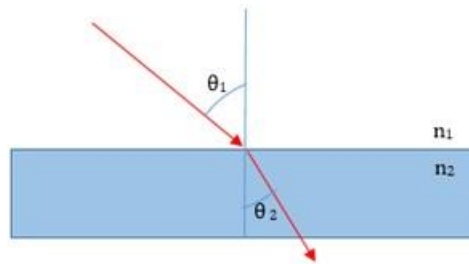
- **Reflexión:** se produce cuando la onda incide sobre una superficie con propiedades distintas al medio que se propaga, provocando que parte de la energía sea reflejada por esta superficie en dirección que forma, con la normal de la superficie el mismo Angulo que la onda incidente.

**Figura 2. Reflexión**



- **Refracción:** se produce cuando la energía de la onda que no fue reflejada, penetra en el medio con dirección distinta a la onda incidente, por la ley de Snell se determina que la relación entre los senos de los ángulos, respecto a la normal son constantes.

**Figura 3. Refracción**



$$n_1 * \text{sen } \theta_1 = n_2 * \text{sen } \theta_2$$

Donde n es el índice de refracción propio de cada medio.

### 3.3 ULTRASONIDO

El ultrasonido son ondas acústicas de alta frecuencia cuya percepción está por encima del oído humano, la frecuencia de las ondas ultrasónicas se acerca a los 20000 Hz.

Las ondas acústicas se presentan en sólidos, líquidos y gases abriendo la posibilidad de usarlas en una gran variedad de aplicaciones industriales, médicas e ingenieriles.

**3.3.1 Principios del ultrasonido.** Para generar el ultrasonido se utiliza el efecto piezoeléctrico de un material, al aplicar una señal eléctrica el material modifica su longitud, al aplicar una tensión alternativa de alta frecuencia este se excita y comienza a vibrar. Se le conoce como transductor al componente que contiene el material piezoeléctrico. El transductor es el encargado de emitir y recibir las ondas ultrasónicas.

### **Equipos para aplicar ultrasonido**

- Un generador electrónico de señal que produce ráfagas de voltaje alternadas.
- Un transductor que emite y/o recibe las ondas ultrasónicas cuando las ráfagas de voltaje alternado son aplicadas al elemento piezoeléctrico.
- Un acoplador para transferir la energía de las ondas de ultrasonido a la pieza de trabajo (zapata).
- Un dispositivo electrónico para amplificar y modificar las señales del transductor.
- Un reloj electrónico o un cronómetro para controlar la operación de varios componentes del sistema.
- Un dispositivo de salida que muestre la información resultante y la proyecte ya sea impresa o en pantalla.

### **Factores que influyen en la trasmisión del ultrasonido a través de la superficie de exploración.**

- Medio acoplante.
- Condición de la superficie y acabado superficial.
- Curvatura superficial.
- Frecuencia y diámetro del cristal.

**3.3.2. Generación del ultrasonido**<sup>7</sup>. Existen numerosos medios de producción de ondas ultrasónicas, aprovechando diversos fenómenos físicos, algunos de los cuales sirven para los END, dependiendo de la frecuencia requerida y del rendimiento a obtener. El concepto básico es el de la conversión de pulsos eléctricos a vibraciones mecánicas y el retorno de vibraciones mecánicas a energía eléctrica.

Estos métodos se pueden dividir en:

- **Procedimientos mecánicos**

En principio son los mismos que los que se emplean para generar sonido audible. Son dispositivos capaces de oscilar que se construyen de tal manera que posean una frecuencia propia correspondientemente alta. Este procedimiento no se utiliza en la rama de ensayos no destructivos.

- **Efecto magnetoestrictivo**

Consiste en aprovechar la propiedad que tiene algunos materiales ferro magnéticos (especialmente el Níquel, además del acero) de contraerse o expandirse en determinada dirección cuando están sometidos a la influencia de campos magnéticos en condiciones especiales. Este efecto es recíproco, lo que permite a su vez emisión y recepción de la onda ultrasónica.

- **Efecto piezoeléctrico**

Este efecto es aprovechado casi universalmente para el ensayo no destructivo de materiales. Los elementos utilizados son, básicamente, una pieza de material polarizado (en cierta parte las moléculas se encuentran cargadas positivamente mientras que en otra parte las moléculas se encuentran cargadas negativamente) con electrodos adheridos a dos de sus caras opuestas. Cuando un campo eléctrico es aplicado a lo largo del material las moléculas polarizadas se alinearán con el

---

<sup>7</sup> RIMOLDI, Claudio; MUNDO, Luis Mariano. Ensayo no Destructivo por método de ultrasonido. [En línea]. Disponible en: <http://www.aero.ing.unlp.edu.ar/catedras/archivos/Apunte%20Ultrasonido>, 2012, vol. 20

campo resultando un dipolo inducido en la estructura cristalina. Esta alineación de las moléculas causará un cambio dimensional, llamado electrostricción. A su vez puede darse la acción opuesta, es decir, producir un campo eléctrico cuando cambian de dimensión.

### 3.3.3 Cristales

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

- **Cuarzo:** Fue el primer material utilizado. Tiene características muy estables en frecuencia, sin embargo, es pobre en la generación de energía acústica y, comúnmente, reemplazado por materiales más eficientes.
- **Sulfato de Litio:** Es muy eficiente como receptor de energía acústica, pero es muy frágil, soluble en agua y su uso es limitado a temperaturas debajo de los 75 °C.
- **Cerámicas sintetizadas:** Producen generadores de energía acústica más eficientes, pero tienen tendencia a desgastarse.

Generalmente el espesor del elemento activo (cristal) utilizado es determinado por la frecuencia de utilización del transductor. Cuanto más altas son las frecuencias requeridas, más delgados serán los cristales utilizados.

**3.3.4 Palpadores o transductores.**<sup>8</sup> En la inspección de metales lo más común es el uso de osciladores piezoeléctricos que son los elementos que generan ultrasonidos. Cuando funcionan como emisor transforma la energía eléctrica en energía mecánica y, cuando actúan como receptor, realizan el paso contrario transformando la energía mecánica en eléctrica. Para que la onda ultrasónica no vibre libremente y se transmita en la dirección del material se le adosa un medio amortiguador de alta impedancia acústica cuya función es ejercer como soporte mecánico del oscilador. El oscilador es un elemento muy frágil por lo que se le protege físicamente junto con el amortiguador y las conexiones eléctricas necesarias se instalan en el interior de una carcasa metálica. El conjunto completo se denomina palpador y constituye el elemento esencial de los equipos de captura ultrasónica.

- **Palpadores de contacto directo:**

Se aplican directamente a la superficie de la muestra, con cierta presión, según la dirección de propagación del haz con relación a la superficie de la muestra, estos palpadores se dividen en palpadores de incidencia normal, angular y superficial.

- **Palpadores de incidencia normal**

Se emplean en los equipos que operan por lo métodos de pulso-eco y de resonancia, y se aplican a problemas de Defectología, metrología y caracterización y se subdividen en:

- Palpadores de cristal único
- Palpadores emisor-receptor
- Palpadores para alta temperatura

---

<sup>8</sup> RODRÍGUEZ GONZÁLEZ, Cristina, et al. Sistema automatizado de detección de defectos en piezas metálicas mediante ensayos no destructivos con ultrasonidos. Universidad de Cantabria, 2012.

- **Palpadores de incidencia angular**

En estos el haz de incidencia está determinado por el ángulo de refracción. Ondas de cizalladura y transversal.

- **Palpadores de incidencia superficial**

En este tipo de palpador las ondas se convierten en ondas de Rayleigh y viajan por la superficie de la pieza.

- **Palpadores de cristal único**

Este tipo de palpadores presentan un amortiguador de cristal y su finalidad es:

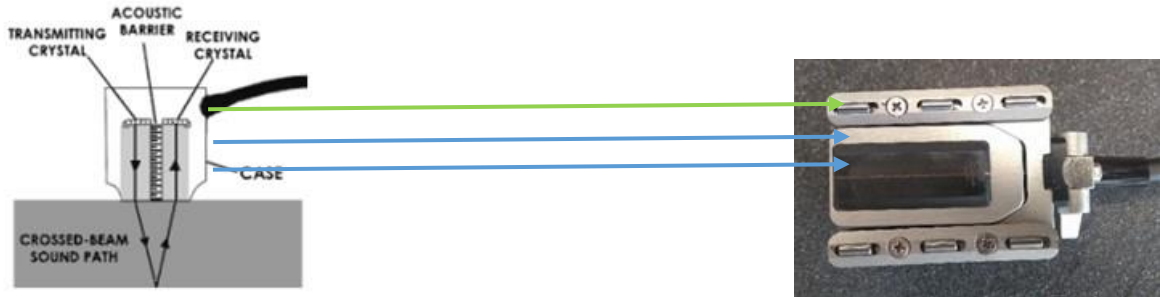
- Reducir el tiempo de oscilación del cristal.
- Absorber las ondas que pudieran interferir en la señal de la pantalla.
- Soportar mecánicamente el cristal piezoeléctrico.

La duración del impulso eléctrico influye decisivamente en la anchura de la zona muerta y en el poder de resolución. Para que el cristal no oscile libremente, es necesario que el amortiguador tenga una impedancia acústica elevada y elevado coeficiente de atenuación.

- **Palpadores de doble cristal**

Poseen dos cristales piezoeléctricos, uno se encarga de producir la señal ultrasónica y el otro de recibirla. Para no afectar su funcionamiento se usa una barrera acústica que los divide y permite que cada uno trabaje por separado, se encuentran ubicados en ángulo generando señales cruzadas en el material.

**Figura 4. Palpador dual y Dual Linear Array Probe Olympus**



Fuente: CLAUDIO RIMOLDI, Luis Mariano Mundo. 2012. Catedra: Ensayos no destructivos por métodos de ultrasonidos

- **Palpadores usados en método de inmersión:**

Estos palpadores no entran en contacto con la pieza, sino que operan en un medio líquido con las propiedades adecuadas para la transmisión de las ondas. Generalmente se usan dentro de un tanque con agua.

**3.3.5 Características de los Palpadores.** Para diseñar palpadores se han de tener en cuenta características fundamentales de los mismos que determinan su calidad y la aplicación para la cual está destinada su uso: frecuencia, resolución, sensibilidad, ángulo, campo emitido y dimensiones.

- **Frecuencia:** El valor de la frecuencia de trabajo de un palpador depende del espesor y tipo de cristal que utiliza. El rango de frecuencias más habitual es de 2 a 4 MHz, aunque se pueden utilizar frecuencias de hasta 15 MHz. Para seleccionar la más adecuada hay que tener en cuenta que, al aumentar la frecuencia, se obtiene una mayor sensibilidad, pero, como aumenta la atenuación de las ondas, disminuye el poder de penetración.
- **Resolución:** Corresponde a la capacidad que posee un palpador para proporcionar en la pantalla del osciloscopio indicaciones separadas de dos reflectores cercanos entre sí en el sentido de la profundidad (resolución en el

campo lejano) o de detectar indicaciones próximas al palpador (resolución en el campo cercano).

### 3.4 TIPOS DE FALLAS EN TUBERÍA DE ACERO

**3.4.1. Corrosión en tuberías.** La corrosión se refiere a la degradación de un material debido a reacciones químicas. La corrosión afecta a diferentes metales de tuberías que se usan en la vida diaria y en plantas industriales.

Al avanzar la corrosión interna del metal, se produce un adelgazamiento de la tubería que la puede dejar fuera de servicio. Al igual que los subproductos derivados de este proceso pueden afectar el fluido que transportan, generando la erosión de la tubería en otros sectores a tal punto que puede obstruir orificios de válvulas.

**Figura 5. Corrosión de Oleoductos**



Fuente: World Iron and Steel. Disponible en: <http://es.worldironsteel.com/news/the-corrosion-of-oil-pipelines-26167601.html>

### 3.4.2 Discontinuidades en soldadura<sup>9</sup>

- **Fisura**

La fisura es la discontinuidad más crítica, en especial si es de tipo lineal y presenta condición muy filosa, dado que tiende a crecer y propagarse al ser aplicada una tensión. Es causada por la sobrecarga, esta puede aparecer al momento de la soldadura o inmediatamente después o al momento de aplicación de carga.

Existen las fisuras que están en dirección paralela al eje longitudinal esta se denominan fisuras longitudinales. Aquellas presentes en dirección perpendicular al eje longitudinal son fisuras transversales.

**Figura 6. Fisura Longitudinal**



Fuente: RUIZ LL., Adalberto. Discontinuidades del metal base y de la soldadura.

---

<sup>9</sup> RUIZ LL., Adalberto Discontinuidades del metal base y de la soldadura. ASNT NDT Level III Services. [Revisado 20 de diciembre de 2019]. Disponible en: [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/d7/3.\\_Discontinuidades\\_en\\_Metal\\_Base\\_y\\_Soldadura.pdf](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/d7/3._Discontinuidades_en_Metal_Base_y_Soldadura.pdf)

**Figura 7. Fisura Transversal**

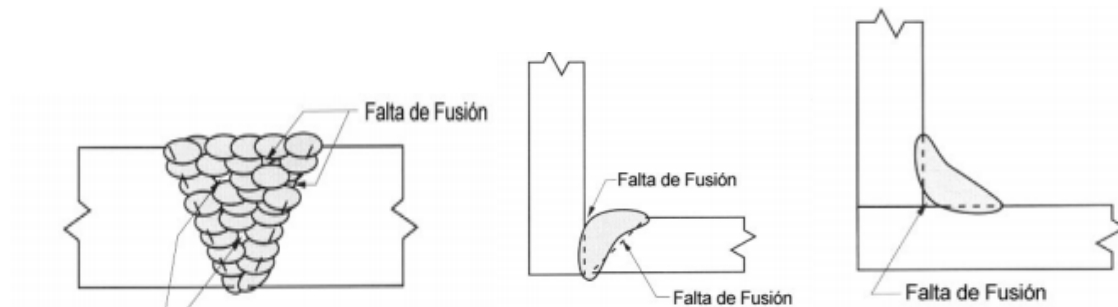


Fuente: RUIZ LL., Adalberto. Discontinuidades del metal base y de la soldadura.

- **Falta de fusión**

Esta discontinuidad se produce cuando la fusión no ocurre entre el metal de soldadura u las caras de fusión o los cordones adyacentes. Esta se puede presentar en diferentes puntos de la soldadura. Con frecuencia la falta de fusión tiene inclusiones de escoria asociadas a ella.

**Figura 8. Discontinuidad por falta de fusión**



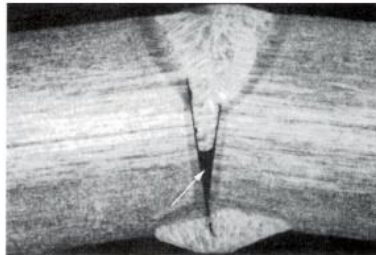
Fuente: RUIZ LL., Adalberto. Discontinuidades del metal base y de la soldadura.

- **Falta de penetración**

Está asociada solamente con la soldadura con bisel. Ocurre cuando el metal de soldadura no se extiende completamente a través del espesor de la junta cuando

es requerida junta con penetración total. Se ubica adyacente a la raíz de la soldadura.

### **Figura 9. Falta de Penetración**



Fuente: RUIZ LL., Adalberto. Discontinuidades del metal base y de la soldadura.

- **Porosidad**

La AWS A3.0 define porosidad como un tipo de discontinuidad que forma una cavidad provocada por gases que quedan ocluidos durante la soldadura. Estos poros son normalmente provocados por la presencia de contaminantes o humedad en la zona de soldadura que se descomponen debido a la presencia de calor de la soldadura y de los gases formados.

### **Figura 10. Porosidad superficial**



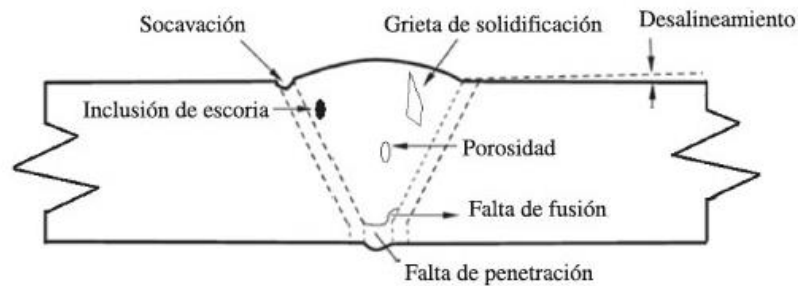
Fuente: RUIZ LL., Adalberto. Discontinuidades del metal base y de la soldadura.

- **Inclusión de escoria**

La inclusión se da cuando un material sólido queda atrapado dentro de la soldadura, como por ejemplo escoria, fundente, tungsteno u óxido.

Las regiones donde aparecen inclusiones de escoria, son secciones que pueden estar adentro de la soldadura o sobre la superficie de la soldadura donde el fundente usado para la protección del metal fundido queda atrapado adentro del metal solidificado. Por lo general las inclusiones de escoria son asociadas con falta de fusión.

**Figura 11. Imperfecciones de soldadura**



Fuente: MADDOX, S.J. "Applying Fitness-for Purpose Concepts to the Fatigue Assessment of Welded Joints". The International Conference on Fatigue. Vol. 1, pp. 72-81.

## 4. DISEÑO METODOLÓGICO

### 4.1 PRIMERA ETAPA

Recopilación de la información secundaria necesaria para desarrollar el tema de investigación.

Consultar información secundaria de fuentes confiables, como lo es la base de datos que ofrece la Universidad Industrial de Santander en temas concernientes a aplicación de ultrasonido phased array, normativas que se deben tener en cuenta y el manejo de software especializado en ingeniería.

**4.1.1 Normas para la soldadura.** Para la soldadura existen una serie de códigos o normas, en las cuales están estandarizados los procesos y acabados que deben tener, con el objetivo de proteger intereses públicos o bienes comunitarios.

Las organizaciones que emiten los códigos que involucran soldadura y que se usan en Colombia son:

**4.1.1.1 AWS- American Welding Society:** La sociedad americana de soldadura se fundó con la misión de contribuir al avance de la ciencia, la tecnología y la aplicación de soldadura y los procesos de corte y unión que le sean afines.

Sus principales códigos son:

- AWS D1.1 Structural Welding code-Steel (Código de soldadura estructural-acero). Para estructuras de acero al carbono y de baja aleación, en espesores mayores a 3 mm.

- ANSI/ASME Boiler and Pressure vessel code( Código para recipientes a presión y calderas de la sociedad Americana de ingenieros Mecánicos )

Los criterios de aceptación y rechazo para conexiones tubulares están a continuación:

La amplitud basada en los criterios de aceptación se basa en 6.13.1 y esta puede ser aplicada en tubería de 24 pulgadas de diámetro o mayores, siempre y cuando se sigan las estipulaciones relevantes de la sección 6 parte F (AWS D1.1).

Al usar ultrasonido el procedimiento y técnica deberán estar en conformidad con la cláusula 6-inspeccion, parte C-criterios de aceptación, 6.13 Inspección por ultrasonido.

El criterio de aceptación para soldaduras sujetas a ultrasonido debe cumplir con los requerimientos de la tabla 6.2 de la norma (AWS D1.1).

### **Procedimiento para determinar la longitud de las discontinuidades.**

#### **Prueba del Haz de luz de Angulo.**

Se usa para determinar las longitudes de las indicaciones que tengan valores de decibeles más serios que una indicación de clase D. La longitud deberá determinarse al medir la distancia entre la localización de la línea central del transductor donde la señal es máxima al valor en el cual la indicación cae en un 50% (6 dB) por debajo del valor para la calificación de discontinuidad.

Bases para la aceptación o rechazo.

Las discontinuidades presentes en la soldadura deberán aceptarse o rechazarse de acuerdo a lo estipulado en la tabla 1, teniendo en cuenta su clasificación de indicación y su longitud.

**Tabla 1. Criterios de aceptación o rechazo de la prueba ultrasónica**

Severidad	Espesor de la Soldadura <sup>a</sup> en pulgadas [mm] y Ángulo del Palpador										
	5/16 [8.0] a 3/4 [20]	> 3/4 [20] a 1-1/2 [38]	> 1-1/2 a 2-1/2 [38-65]			> 2-1/2 a 4 [65-100]			> 4 a 8 [100-200]		
Clase	70°	70°	70°	60°	45°	70°	60°	45°	70°	60°	45°
Clase A	+5 y menor	+2 y menor	-2 y menor	+1 y menor	+3 y menor	-5 y menor	-2 y menor	0 y menor	-7 y menor	-4 y menor	-1 y menor
Clase B	+6	+3	-1 0	+2 +3	+4 +5	-4 -3	-1 0	+1 +2	-6 -5	-3 -2	0 +1
Clase C	+7	+4	+1 +2	+4 +5	+6 +7	-2 a +2	+1 +2	+3 +4	-4 a +2	-1 a +2	+2 +3
Clase D	+8 y mayor	+5 y mayor	+3 y mayor	+6 y mayor	+8 y mayor	+3 y mayor	+3 y mayor	+5 y mayor	+3 y mayor	+3 y mayor	+4 y mayor

Fuente: Norma AWS D1.1 Structural Welding code-Steel. Table 6.2

### Clasificación de la discontinuidad.

Clase A- Irregularidades grandes

Clase B-irregularidades medianas

Clase C- irregularidades pequeñas

Clase D- irregularidades menores

**Tabla 2. Nivel de barrido para inspección de soldadura**

Niveles de Exploración	
Trayecto del sonido <sup>2</sup> en pulg. [mm]	Sobre Cero Referencia dB
hasta 2-1/2 [ 65mm ]	14
> 2-1/2 hasta 5 [65-125mm]	19
> 5 hasta 10 [125-250 mm]	29
>10 hasta 15 [250-380 mm]	39

Nota

2. Esta columna se refiere a la distancia del trayecto del sonido; No al espesor del material.

Fuente: Norma AWS D1.1 Structural Welding code-Steel. Table 6.2

**4.1.1.2 ASME- American Society of Mechanical Engineers:** La sociedad Americana de Ingenieros mecánicos, es una asociación de profesionales, que han creado el código de diseño, construcción, inspección y pruebas para equipos, entre otras calderas y recipientes a presión.

Dentro de sus códigos encontramos:

- ASME B31.3 Process Piping (Tuberías de Proceso). Este código se usa para regular los trabajos de soldadura en tuberías para procesos.

#### **Capítulo VI. Inspección, examen y prueba. Párrafo 344**

Examen ultrasónico.

El examen de soldadura por ultrasonido se debe realizar basado en el código BPV. Sección V. Artículo 4.

**4.1.1.3 API- American Petroleum Institute:** El instituto americano del petróleo, es la principal asociación comercial de los Estados Unidos, ya que representa a las corporaciones encargadas de la producción, refinamiento y distribución de la industria petrolera y de gas natural. Realiza el establecimiento y certificación de los estándares de la industria.

Código:

- API 1104 Welding of Pipelines and Related Facilities (Soldadura de oleoductos e instalaciones similares). Este regula la soldadura de sistemas de tubería para combustible y productos de petróleo.

**4.1.1.4 ICONTEC- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificadas:** Es el Organismo Nacional de Normas de Colombia. Reproduce normas técnicas y la certificación de normas de calidad para empresas y actividades profesionales. Es el

encargado de la representación de la organización internacional para la estandarización (ISO), en Colombia.

Código:

- NTC 4991:2009 Soldadura de líneas de tubería y de instalaciones relacionadas. Esta norma trata acerca de soldaduras con gas y con arco eléctrico de soldaduras en tuberías de acero al carbono y de baja aleación usadas en la industria petrolera.

### **NTC 4991:2009 Sección 9. Criterios de aceptación para ensayos no destructivos.**

Derechos de rechazo.

Los métodos de ensayo no destructivo se limitan a la información que se puede obtener de ellos, por lo tanto, dependiendo de los resultados se deben mirar los criterios de aceptación y determinar si una discontinuidad puede ser crítica en la soldadura con el objetivo de rechazarla o admitirla.

Ensayo de ultrasonido

#### **Clasificación de las indicaciones**

Las indicaciones producidas en un ensayo de ultrasonido no se deben confundir con defectos, en muchas ocasiones se generan indicaciones producto de factores como cambio de la geometría, cambio en el perfil y otras, pero no son relevantes para su aceptabilidad.

Tipos de indicaciones:

- Indicaciones lineales: se presentan en la dirección de la longitud de la soldadura. Causadas por falta de penetración, fusión incompleta e inclusión de escoria.

- Indicaciones transversales: indicaciones a través de la soldadura. Causadas por grietas, inclusiones de escoria y fusión incompleta.
- Indicaciones volumétricas: son indicaciones tridimensionales, causadas por inclusiones, agujeros y poros.
- Indicaciones relevantes: son las ocasionadas por las imperfecciones. Se evalúan de acuerdo al numeral 11.4.7.

### **Criterios de aceptación.**

Una indicación se considerará defecto si:

- La indicación se identifica como grietas (C).
- Las indicaciones con un tamaño vertical (a través del espesor de pared del tubo) son mayores a  $\frac{1}{4}$  del espesor de pared de la tubería.
- Indicaciones múltiples (a través del espesor de pared de tubo) vertical que exceda la mitad del espesor de pared del tubo.

Una indicación lineal subsuperficial, identificada por estar dentro de la soldadura se considera defecto si:

- La longitud total acumulada de las indicaciones, en una longitud continua de 300 mm de soldadura, excede los 50 mm.
- La longitud total acumulada de las indicaciones excede el 8% de la longitud de la soldadura.

La indicación volumétrica individual (VI) será considerada defecto cuando la dimensión máxima de las indicaciones VI exceda 3 mm, tanto en ancho como en largo.

Para realizar el ensayo por ultrasonido, en la inspección de soldaduras en tuberías, se deben aplicar los requisitos del numeral 11.4 NTC 4991.

Método de ensayo por ultrasonido: procedimiento por ultrasonido

Se deben conocer como mínimo los siguientes ítems para realizar el ensayo de ultrasonido para tubería:

- Tipo de soldadura
- Tipo de material: tamaño, grado, espesor y proceso de fabricación.
- Condiciones de la superficie
- Instrumentos de ultrasonido
- Acoplante
- Técnica de ensayo
- Bloque de referencia
- Datos de calibración
- Tipo de registro de resultados

En este apartado se especifica que se debe usar una sensibilidad de exploración de amplitud de referencia de 80%, más 4 dB, al usar la técnica pulso-eco.

**4.1.2. Recopilación de información primaria.** En esta etapa se recolecta la información primaria referente a las características técnicas del equipo de ultrasonido OMNISCAN MX2.

**4.1.2.1 Patrones de calibración usados en ultrasonido:** Un patrón de calibración es utilizado para definir los parámetros de operación del equipo ultrasónico o para la determinación de las condiciones del ensayo.

**Bloque de referencia:**

Se usa para comparar la altura de un eco de discontinuidad o la ubicación de la discontinuidad en la pieza de ensayo, con respecto a las discontinuidades que tiene el bloque o patrón de calibración.

Los bloques de referencia están estandarizados para el cumplimiento de las normas con las cuales se hacen las pruebas de ultrasonido, garantizando de esta manera que el equipo sonda y palpador trabaje como se debe. Gracias a los bloques de calibración se puede seleccionar el nivel de sensibilidad o ganancia para la detección de discontinuidades según las dimensiones que se quieren analizar.

### **Bloque de referencia I.I.W**

Son utilizados para la calibración de la distancia-velocidad, la sensibilidad y retardo de suela.

Existen tres tipos de bloques: V1, V2 y para calibrar resolución.

El bloque de referencia utilizado es tipo V1, el cual está modificado para permitir calibrar la sensibilidad, velocidad y retardo de suela. Permite la calibración de palpadores normales y angulares.

**Figura 12. Bloque de referencia ASTM IWW de Olympus**



Los equipos de ultrasonido requieren para el proceso de inspección estar correctamente calibrados utilizando patrones de calibraciones específicos para cada aplicación de la prueba, tipo de falla que se prevé encontrar o el tipo de sonda a utilizar.

Para la calibración de los equipos de ultrasonido, se emplean bloques metálicos con fallas inducidas artificialmente, hay 2 tipos de bloques que se emplean para la operación de los equipos de ultrasonido, bloque de calibración y bloque de referencia. Una vez se ha calibrado el equipo se pueden comparar los valores obtenidos en la calibración para la velocidad de propagación de la onda en acero mediante la figura 12.

**Figura 13. Velocidad de propagación del sonido onda longitudinal y transversal**

MATERIAL	V. ONDA LONGITUDINAL m/s	V. ONDA TRANSVERSAL m/s
ACERO	5920	3240
ALUMINIO	6320	3140
AGUA	1480	—

**4.1.2.2 Equipos usados para la detección de fallas por ultrasonido phased array.**

**Omniscan MX2**

**Figura 14. Omniscan MX2.**



Fuente: OLYMPUS. Disponible en <https://www.olympus-ims.com/en/omniscan-mx2/>

### Sonda de matriz lineal dual.

Referencia: 7.5DL32-REX1-HC de OLYMPUS.

**Figura 15. Dual Linear Array Probe**



La sonda de matriz lineal dual es especial para ser usada en tubería. Esta permite ajustarse a la curvatura del tubo permitiendo un mejor contacto entre la sonda y la superficie. Su principal función es la detección de corrosión, permitiendo diferenciar las imperfecciones que pueda presentar la tubería como pérdida de espesor y porosidades.

Esta sonda permite tener una mayor cobertura del haz, mayor velocidad de escaneo y permite obtener una imagen de escaneo en C con mejor resolución teniendo una densidad mayor de puntos de datos. Con estas nuevas características que le dan mayor ventaja sobre transductores ultrasónicos convencionales se mejora la probabilidad de detección de pérdidas de espesor crítico.

Características principales:

- Permite obtener imagen de alta resolución.
- Detecta imperfecciones de hasta 1 mm debajo de la superficie.
- Opción para escanear en superficies de alta temperatura.
- Ancho de cobertura de haz de 30 mm.

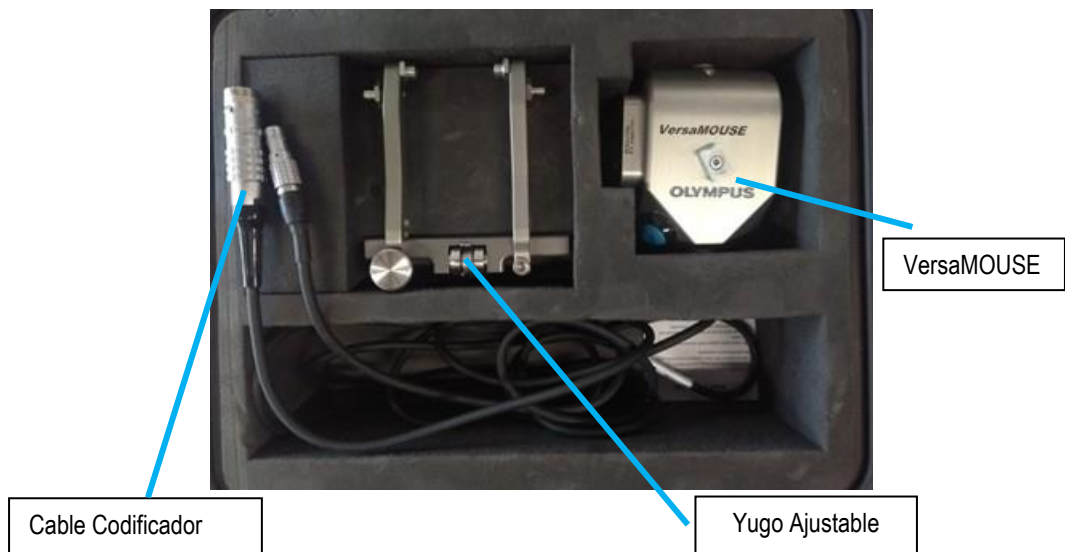
- Su ajuste rapido permite adaptarse a diferentes diametros y para superficies planas.
- Fabricada con materiales de alta resistencia.
- Permite inspeccionar hasta 80 mm en acero al carbono.
- Sus archivos de configuracion se pueden usar en los diferentes equipos OmniScan (MX,MX2 Y SX).

### **VersaMOUSE**

El VersaMOUSE es un escáner utilizado en escaneos codificados lineales en conjunto con una sonda, permitiendo hacer mapeos en 2-D e inspecciones de corrosión.

El VersaMOUSE trae una serie de elementos con los cuales es posible ajustarle una sonda para realizar inspección, trae un yugo ajustable que es fácil de instalar en una cuña de tipo IHC utilizando agujeros de fijación estándar, o para el caso de la sonda 7.5DL32-REX1-HC se ajusta directamente también trae un cable codificador que se conecta al equipo Omniscan MX2.

**Figura 16. Equipo VersaMOUSE**



Un dato importante del VersaMOUSE y que se debe tener en cuenta para la calibración del equipo antes de realizar la inspección es la resolución del codificador la cual es de 8.4 pasos / mm.

### **Equipos usados para la inspección de la soldadura**

#### **Sonda OLUMPUS 5L16 A10**

La sonda Olympus 5L16 A10 es una sonda universal diseñada para poderle adaptar una cuña o palpador. Esta sonda se puede usar en la inspección manual o automatizada de soldaduras de 6,35 mm a 38 mm de espesor y en inspección de piezas fundidas, forjados, tuberías, tubos y componentes mecanizados y estructurales para detectar grietas y defectos de soldadura.

**Tabla 3. Especificaciones y dimensiones de la sonda para inspección de soldadura**

Número de pieza	Número de artículo	Frecuencia (MHz)	Número de elementos	Paso (mm)	Apertura activa (mm)	Elevación (mm)	Dimensiones externas mm		
							L	W	H
5L16-A10	U8330595	5.0	Dieciséis	0,6	9.6	10	23	16	20

**Figura 17. Sonda 5L16 A10 De Olympus**



**Cuña para sondas de haz angular. SA10-N55S.**

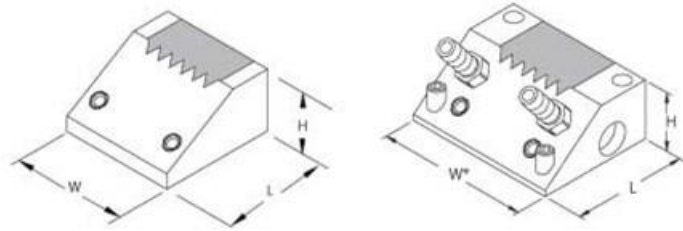
La cuña o palpador utilizado para realizar la inspección de la soldadura en el tubo fue la SA10-N55S la cual presenta las siguientes características:

- Las cuñas para sondas de haz angular se pueden encontrar en ángulos refractados de 0°, 45°, 55° y 60° en acero para inspecciones de haz angular de 30° a 70.
- Diseñadas para escaneo manual y automático

**Tabla 4. Especificaciones y dimensiones de la cuña para inspección de soldadura**

Número de pieza	Tipo de sonda	Angulo nominal de haz refractado	Barrido recomendado(°)	Orientación de sonda	Dimensiones externas mm			
					L	W	W*	H
SA10-N55S	A10	55°SW	30 a 70	Normal	23	23	40	14

**Figura 18. Dimensiones cuña Angular**



Fuente: OLYMPUS. Cuñas para sondas de haz angular. Disponible en: [https://www.olympus-ims.com/en/probes/wedges/#!cms\[tab\]=%2Fprobes%2Fwedges%2Foptions](https://www.olympus-ims.com/en/probes/wedges/#!cms[tab]=%2Fprobes%2Fwedges%2Foptions)

**Figura 19. Cuña Angular SA10 N55S**



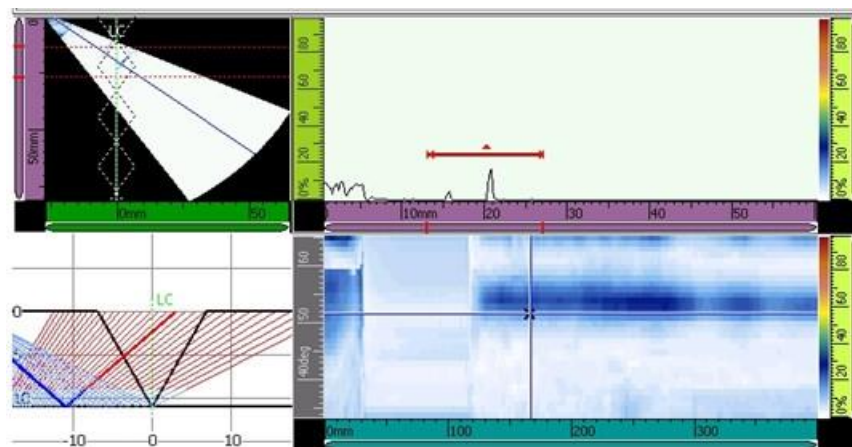
**Figura 20. Sonda y cuña angular ensambladas**



#### 4.1.2.3 Vistas de los resultados en la inspección en el equipo Omniscan MX2:

Los datos obtenidos al realizar la inspección con ultrasonido pueden ser vistos en diferentes formatos, los cuales permiten realizar un análisis más completo de los resultados, en la pantalla se pueden observar las vistas individual o simultáneamente como se muestra en la ilustración 6.

**Figura 21. Representación de los datos en el equipo Omniscan.**

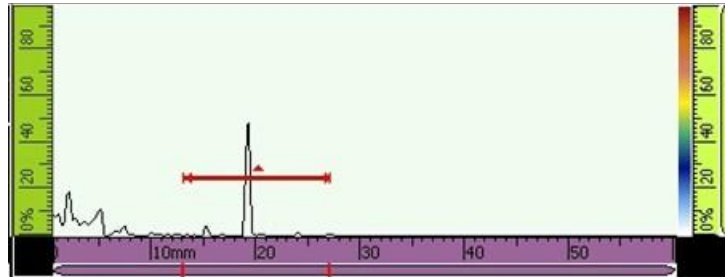


#### **Representación tipo A-scan.**

En esta representación se obtienen la cantidad de energía recibida en función del tiempo. Dependiendo de la amplitud de la señal se puede determinar la existencia de una discontinuidad. En general aparecen picos al inicio y final del eje, pero estos no corresponden a señales generadas debido a una posible discontinuidad, son producto de ecos generados por el contacto de la sonda con el material o del contacto de la sonda, la zapata y el medio acoplante. El pico que aparece al final por lo general es producto del eco de la pared final donde se refleja la onda, este puede variar su amplitud dependiendo de la energía que se pierde por las discontinuidades.

En esta vista aparece lo que se conoce como una puerta la cual es la línea roja, lo que se busca es que las señales obtenidas corten la puerta lo que permite el análisis de la señal en las demás vistas.

**Figura 22. Vista A-scan**



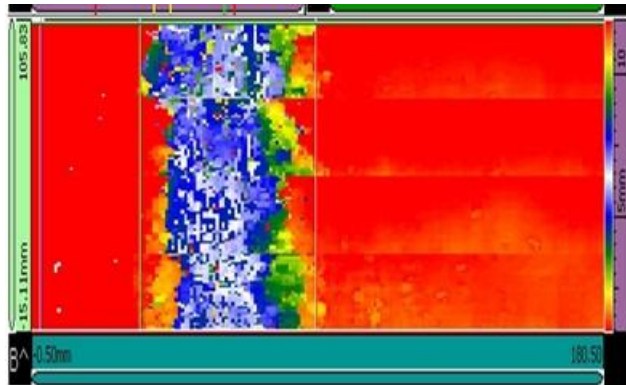
### **Representación tipo C-scan.**

Esta representación muestra una vista del plano superior analizado de la pieza, mediante el uso de una escala de colores se pueden determinar los cambios de espesor y generar una imagen de las discontinuidades que se presenten.

**Figura 23. Tubo con pérdida de espesor**



**Figura 24. Resultados en representación C-scan**



**Representación tipo S-scan.**

Esta representación también llamada barrido sectorial, representa una sección transversal del elemento inspeccionado, se puede usar en el análisis de soldaduras las cuales requieren transductores angulares.

**Figura 25. Bloque de calibración y palpador angular**



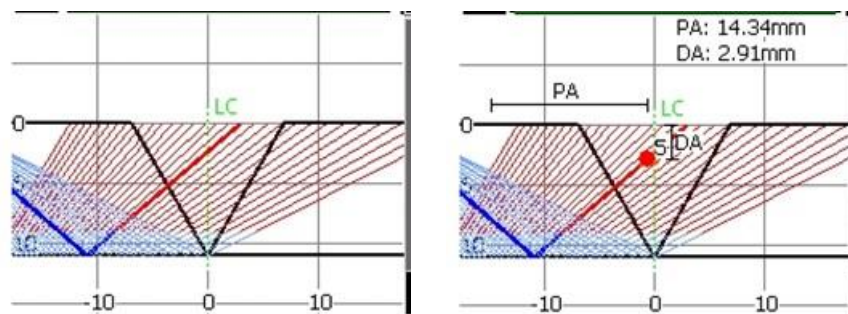
**Figura 26. Vista S-scan**



**Representación Ray Tracing.**

Esta representación permite hacer un análisis especial sobre el cordón de soldadura, permitiendo la detección, dimensionamiento y localización de las fallas presentes.

**Figura 27. Representación Ray Tracing**



**4.2. SEGUNDA ETAPA: Caracterización de la pieza de ensayos**

Descripción detallada de la función que desempeñaba la muestra obtenida para los ensayos y el tipo de material, lugar de funcionamiento e instalación a la cual pertenecía.

#### 4.2.1 Antecedentes de la tubería usada para la inspección perdida de espesor y corrosión

- La línea de transferencia de fluidos del campo Dina Norte, transporta aproximadamente 3.300 BFPD con un BS&W de 83% y 924 KPCD de gas, a este colector convergen líneas de fluidos multifásico (agua, hidrocarburo y gas) y líneas de pozos con aporte 100% gas como el casing del pozo Tempranillo 2, el ducto de transferencia ha operado en estas condiciones desde el año 2016.
- La línea fue construida en el año 2009 (10 años), por la firma Quimonsa en material API 5L-X42, Ø10in, espesor nominal: 0.365in, teniendo como origen el *manifold* principal de DN conocido como "*manifold* tempranillo" y como destino la Batería Cretáceos, la línea se encuentra enterrada 100% (5630m de longitud aprox), con recubrimiento epóxico, sin protección catódica y compartiendo el derecho de vía con la línea de transferencia Tempranillo 2 de Ø10in y la línea de transferencia Brisas Ø4in esta última en material no metálico (soluforce).
- La línea no ha presentado antecedentes de falla con pérdidas de contención, se realizó una única limpieza mecánica con poli-pig hace 1.5 años en el cual se evidenció acumulación de arenillas al interior del ducto.
- La línea se encontraba creada en SAP con la denominación "Línea Colector General Tempranillo 10" y código SAP 10122091 sin planes de mantenimiento o inspección.
- La línea NO tiene antecedentes de algún tipo de inspección directa (UT, MFL, LRUT, etc.) o indirecta (PCM/DCVG/ECDA, etc).

- La línea se encontró incluida dentro de la valoración de análisis de riesgos RBI, en la plantilla “RBI GDH HUILA 2015-01-10”, con valoración de riesgo: DESPRECIABLE y creada como un segmento de principio a fin, con el siguiente plan de acción: “INSPECCION POR SCAN B, MONITOREO DE AGUAS, MONITOREO DE GASES, VELOCIDAD ELECTROQUÍMICA., MEDICIÓN DE VELOCIDAD DE CORROSIÓN EN LÍNEA, IMPLEMENTAR PLAN DE LIMPIEZA CON MARRANEO”.
- Los pozos del campo Dina Norte NO tienen tratamiento químico para el control de la corrosión, solo para controlar la precipitación de parafinas, el pozo tempranillo 2 tiene inyección continua de 1.5 GPD de inhibidor de incrustación.
- En la Tabla 1 se describen características del diseño y operación del sistema de transporte Dina Norte a Dina Cretáceo.

**Tabla 5. Datos Técnicos Línea de transferencia DN-DC**

<b>Código SAP:</b>	20002351	<b>Material de Fabricación:</b>	API 5L-X42
<b>Diámetro Nominal:</b>	10 in	<b>Año de construcción:</b>	2009 (10 años)
<b>Recubrimiento:</b>	Epóxico	<b>Espesor Nominal:</b>	0.365in
<b>Longitud:</b>	6.1km	<b>Presión de operación:</b>	180psi ( <i>manifold</i> ) 60psi (DK)
<b>Enterrado:</b>	100%	<b>Temperatura de operación:</b>	110°F
<b>Cruces de vía:</b>	2 (Brisas y Vía Nacional RN45)	<b>Protección Catódica:</b>	NO
<b>Trampas raspador:</b>	SI (2)	<b>Cupones de corrosión:</b>	NO

**4.2.2 Antecedentes de la tubería usada para la inspección de soldadura.** Se cuenta con 2 tramos de acero 1020 con un diámetro nominal de 2.365 in y un espesor de 0.465 in que fue unido mediante soldadura por electrodo, esto fue utilizado inicialmente para realizar pruebas de calidad, a los soldadores del SENA que estaban buscando certificarse; para los fines del proyecto se le introdujeron 3 fallas superficiales a la soldadura que estos realizaron.

El tipo de soldadura que utilizaron en la pieza es AWS-TIPO V.

### **4.3 TERCERA ETAPA: Patrón de calibración**

Basados en la caracterización de la pieza de ensayos y conociendo el material de la pieza obtenida (API 5L-X42) y basados en la norma ASME E164, implementada en la construcción de los bloques de referencia para la calibración de equipos de ultrasonido, se selecciona el modelo más adecuado y que se ajuste apropiadamente a los requerimientos de las pruebas.

### **4.4 CUARTA ETAPA: Determinación de la zona de aplicación de la técnica**

Para la aplicación de la técnica se va a realizar un barrido de toda la zona central y a lo largo del tubo con el fin de obtener basta información y abarcar todas las posibles fallas presentes en la tubería.

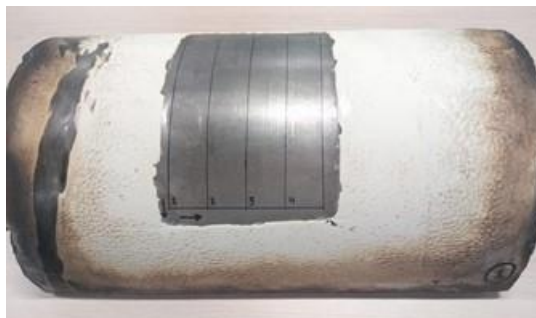
#### **4.5 QUINTA ETAPA: Preparación de la muestra para la aplicación de ultrasonido phased array.**

Se Preparará la tubería de estudio para la aplicación de la técnica mediante la respectiva limpieza, retiro de recubrimiento, pulido de esta y demarcación de la zona de inspección.

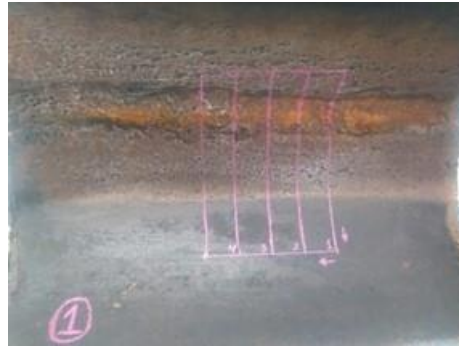
**Figura 28. Tubería N°1. Para análisis de pérdida de espesor**



**Figura 29. Tubo N°1. Preparado para la inspección**



**Figura 30. Zona interna del tubo N°1**



**Figura 31. Tubería N°2 para análisis de porosidades**



**Figura 32. Tubería N°2 preparada para la inspección**



**Figura 33. Zona interna del tubo N°2**



**Figura 34. Tubo para inspección de soldadura**



#### **4.6 SEXTA ETAPA: Elaboración de la metodología de aplicación.**

Realizar el manual guía de aplicación de la técnica de ultrasonido phased array basado en la normativa.

Aplicación de la técnica de ultrasonido phased array en la pieza de ensayos.

Inspección del elemento utilizando el equipo de ultrasonido OMNISCAM MX2 empleando la técnica phased array

**Análisis de resultados.**

Comparar los resultados obtenidos mediante la inspección por ultrasonido con las fallas presentes en el elemento de estudio y concluir el éxito en la elaboración del trabajo.

## **5. PREPARACION DEL EQUIPO OMNISCAN MX2 PARA LA IMPLEMENTACION DE LA SONDA 7.5DL32-REX1-HC DE LA MARCA OLYMPUS, PARA DETECCIÓN DE POROSIDADES Y PERDIDA DE ESPESOR EN TUBERÍA.**

### **5.1 ARCHIVOS DE CONFIGURACIÓN DE LA SONDA 7.5DL32-REX1-HC**

El equipo OMNISCAN MX2 cuenta con el software MXU 4.4R5, el cual se puede descargar y actualizar desde la página de OLYMPUS, este software se guarda en una memoria SD la cual se introduce al equipo y con el cual se puede aplicar la técnica de ultrasonido phased array. La sonda 7.5DL32-REX1-HC cuenta con unos archivos adicionales que complementan el software base del equipo los cuales permiten realizar la inspección por ultrasonido phased array para 3 diferentes configuraciones de espesor de tubería.

Los archivos adicionales para la sonda se deben incorporar al software MXU 4.4R5 del Omniscan MX2. Estos archivos vienen con la sonda en una memoria que se puede ver en la imagen xx, y por medio de un computador se cargan a la memoria que se está usando en el equipo. Una vez realizado esto se puede utilizar la sonda para la inspección.

En las siguientes imágenes se explican los pasos a realizar para cargar los archivos de configuración de la sonda a la memoria del Omniscan y ejecutarlos.

Pasos:

1. Conectar la memoria que viene con la sonda y la memoria SD del Omniscan MX2 al computador.

**Figura 35. Memoria SD Omniscan MX2**



**Figura 36. Memoria de la sonda-Corrosión**



Al conectar la memoria de la sonda se abren los siguientes archivos.

**Figura 37. Archivos memoria corrosión**

Nombre	Fecha de modificación	Tipo	Tamaño
MX	02/10/2019 3:24 p. m.	Carpeta de archivos	
MX2PA1	02/10/2019 3:24 p. m.	Carpeta de archivos	
SX-MX2PA2	02/10/2019 3:24 p. m.	Carpeta de archivos	
User	30/08/2019 10:48 a. m.	Carpeta de archivos	
Utilities	02/10/2019 3:24 p. m.	Carpeta de archivos	
AutoRun	08/12/2014 2:45 p. m.	Información sobre...	1 KB
DUAL LINEAR ARRAY PROBE	08/12/2014 2:56 p. m.	Archivo MOV	68.685 KB
Omniscan	16/07/2014 11:37 a. m.	Icono	1 KB
ReadMe	05/12/2014 12:25 p. m.	Documento de te...	2 KB
Start	11/08/2014 5:31 p. m.	Archivo de secuen...	2 KB

De los archivos seleccionamos “Start” y se nos abre la siguiente ventana:

**Figura 38. Ejecutable software corrosión**



Seleccionamos la opción “Install the Setup Files” y nos abre la siguiente ventana:

**Figura 39. Instalación de archivos**



En esta ventana seleccionamos primero la parte que dice “MX2 with PA1 module”. Al seleccionar este ítem se especifica que el equipo a usar será el Omniscan MX2.

En “Destination Drive” seleccionamos la memoria del Omniscan que aparece en nuestro caso con el nombre de (F:).

**Figura 40. Iniciar la instalación.**



Para terminar con la instalación de los archivos seleccionamos “Start Installation”.

Nota: estos pasos se deben hacer siempre y cuando el software del equipo Omniscan no cuente con los archivos de configuración de la sonda. En el equipo del laboratorio ya están cargados los archivos a la memoria y se pueden abrir al momento de utilizar la sonda 7.5DL32-REX1-HC siguiendo la ruta: ARCHIVO/Abrir/DLA MX2PA1\_3el\_1-13mm depth.ops.

2. Ruta para revisar los archivos de configuración de la sonda en el Omniscan MX2.

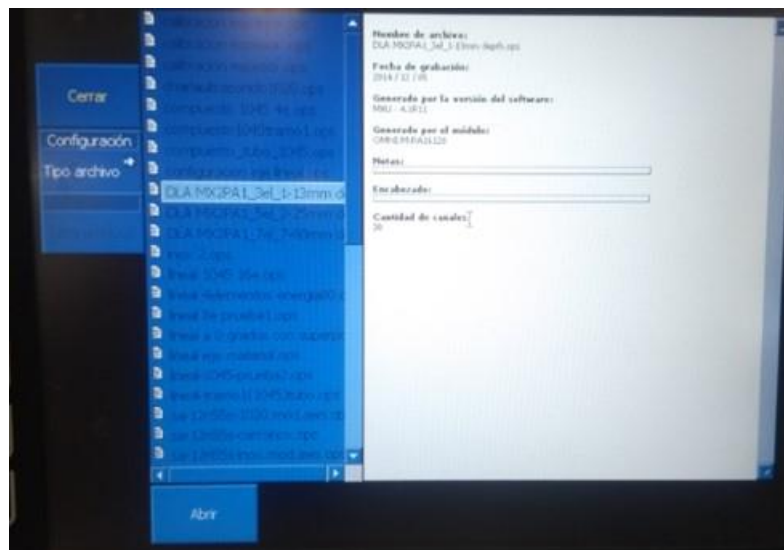
Seleccionamos:

- Archivo
- Abrir
- DLA MX2PA1\_3el\_1-13mm depth.ops

Figura 41. Configuración del inicio del omniscan mx2



Figura 42. Archivo DLA MX2PA1\_3



**Nota:** Hay 3 posibles archivos para seleccionar de la sonda, cada uno depende del espesor de la tubería a inspeccionar en este caso se selecciona la de 1 a 13 mm.

## 6. METODOLOGÍA DE APLICACIÓN DE LA PRUEBA DE ULTRASONIDO (CORROSION, PERDIDA DE ESPESOR).

### 6.1 EQUIPOS REQUERIDOS PARA LAS PRUEBAS

- SONDA

Figura 43. Sonda



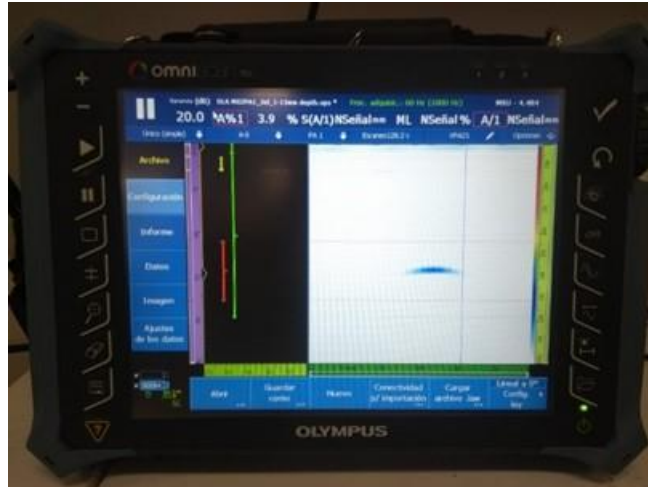
- EQUIPO VERSA MOUSE

Figura 44. VersaMOUSE



- EQUIPO OMNISCAN MX2

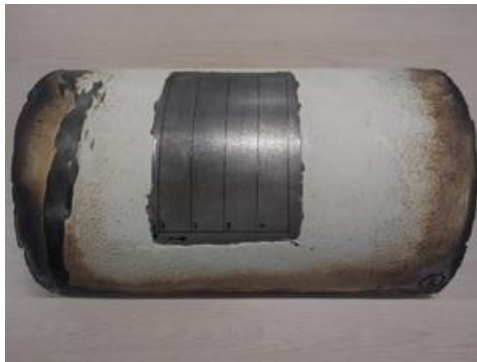
Figura 45. Equipo Omniscan MX2



## 6.2 PIEZAS DE INSPECCION (1 Y 2).

### PIEZA PARA INSPECCION DE ESPESORES

Figura 46. Pieza para inspección de espesores



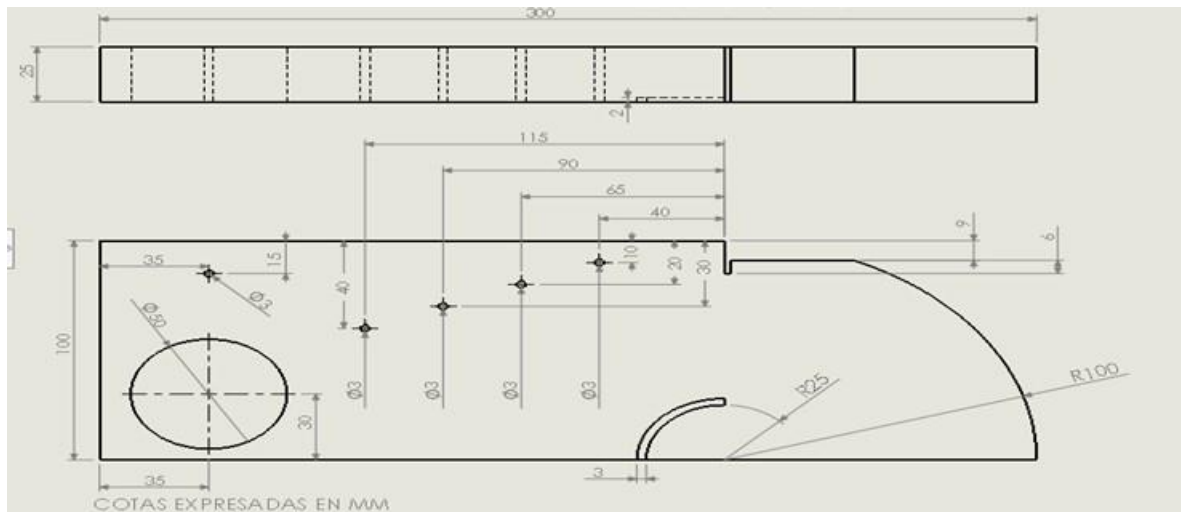
## PIEZA PARA INSPECCION DE POROSIDADES

Figura 47. Pieza para inspección de porosidades



## PATRÓN DE CALIBRACIÓN MODIFICADO

Figura 48. Bloque de calibración IIW. Modificado





### 6.3 INSUMOS DE APLICACIÓN

#### GEL DE ULTRASONIDO

Figura 49. Gel acoplante



## 6.4 PASOS PARA LA CALIBRACIÓN DE LA SONDA DE CORROSIÓN Y PERDIDA DE ESPESOR

**Paso 1:** Se va a configurar el equipo para realizar el análisis de corrosión y pérdida de espesor con el software especificado (DLAMX2PA1\_3el\_1-13mmdepth.ops). Este software viene dado por el fabricante del equipo Omniscan.

Para comenzar con la configuración se enciende el equipo presionando el botón de encendido, se escoge el idioma a emplear en la interfaz del equipo seguidamente se selecciona el programa de ejecución del equipo MXU 4.4. Luego de esto el equipo iniciara.

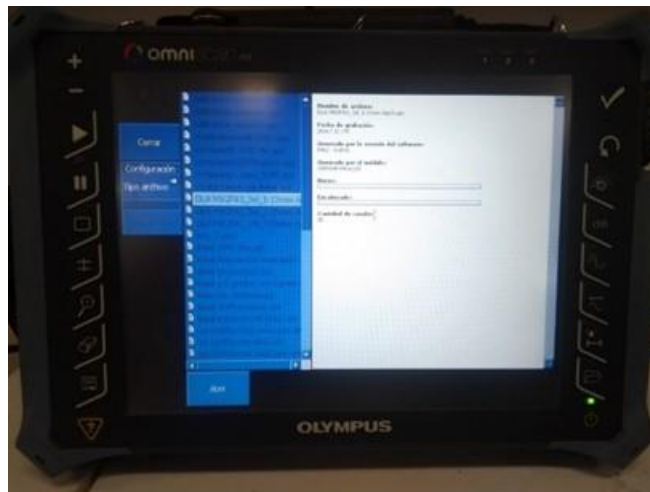
**Paso 2:** Se sigue la siguiente ruta para iniciar con la calibración, Archivo-abrir. Como se muestra en la figura 51.

**Figura 50. Interfaz inicial equipo de ultrasonido**



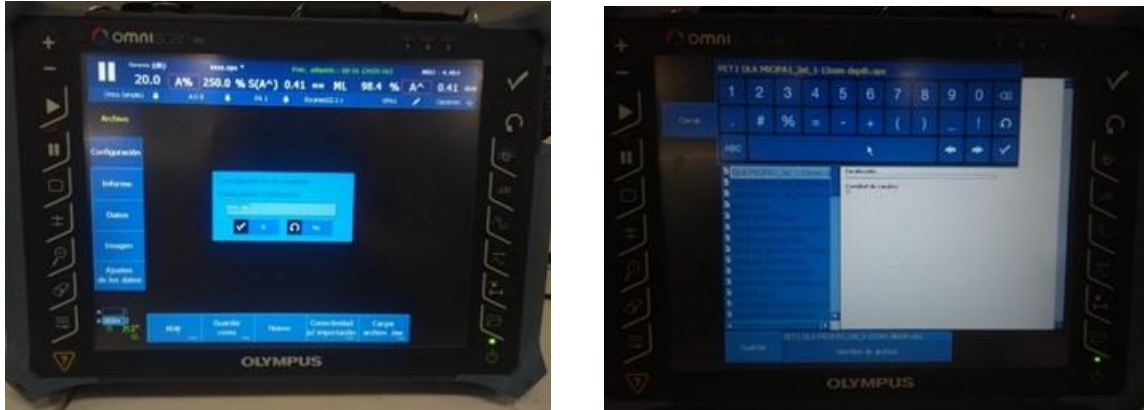
En la interfaz que se abre buscar el archivo “**DLAMX2PA1\_3el\_1-13mmdepth.ops**” el cual contiene el software que configura la inspección de pérdida de espesores y corrosión mediante la sonda “**7.5 DL32-REX1-HC**” seleccionar nuevamente “abrir” para cargar la configuración. Como se muestra en la figura 52.

**Figura 51. Archivo de Inspección**



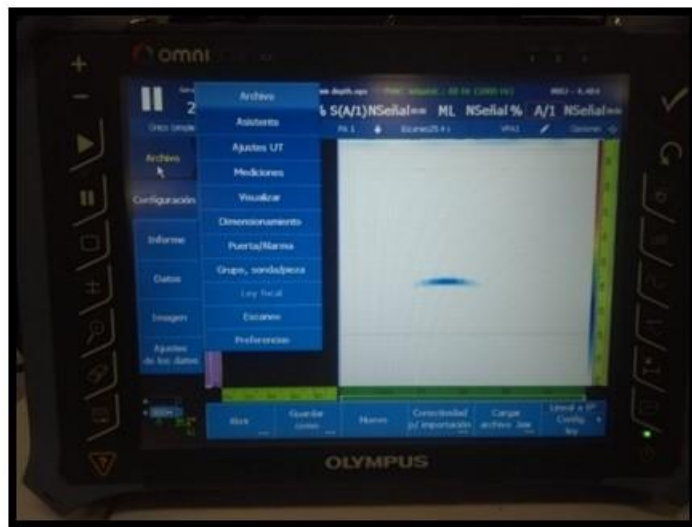
Para la configuración guardada en el equipo previamente es posible que aparezca un mensaje en la interfaz del equipo preguntando si va a sobrescribir sobre el archivo previamente guardado, se debe dar en “NO” para no modificar el archivo original.

**Figura 52. Menú para guardar archivos.**



Para continuar una vez cargado el archivo a utilizar se procede a dar en archivo>asistente para desplegar el menú que trae el equipo. Figura 54.

**Figura 53. Interfaz para el inicio de la configuración**



Para la configuración del equipo se requiere ajustar 3 parámetros.

## Configuración del asistente:

- Pieza y soldadura
- Configuración
- Calibración.

**Figura 54. Interfaz para el inicio de la configuración**



Como el software de inspección ya tiene preestablecidos en su configuración varios parámetros fijos, se proceden a modificar aquellos necesarios para la aplicación de la prueba.

### **Pieza y soldadura.**

En esta fase vamos se procede a modificar el tipo de pieza a la cual se le va a realizar la prueba la cual es una **tubería de acero al carbono con un diámetro de 9 in y un espesor de 0,9 mm**

### **Configuración.**

En esta fase no se permite modificar ningún parámetro.

## Calibración.

En la Ilustración 56 se muestran los submenús que se va a desplegar para seleccionar los parámetros de ajuste.

**Figura 55. Interfaz para el inicio de la calibración de sensibilidad.**



En el submenú "TIPO" se selecciona "ultrasonidos" como se muestra en la Figura 57.

**Figura 56. Submenú TIPO.**



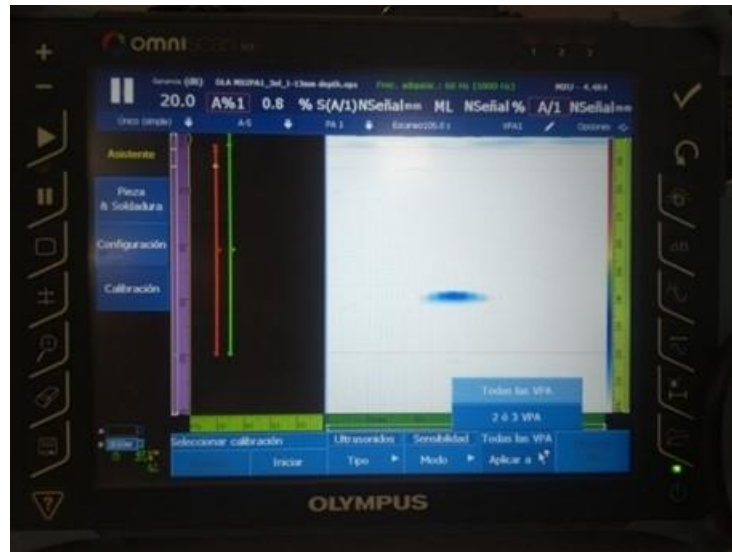
En el submenú “MODO” se selecciona “**Sensibilidad**” como se muestra en la figura 58.

**Figura 57. Submenú MODO**



En el submenú “APLICAR A” se selecciona “**Todos los ángulos**” como se muestra en la Figura 59.

**Figura 58. Submenú APLICAR A.**



**Cumplidos estos pasos se procede a dar en “iniciar”.**

**Calibración de sensibilidad.**

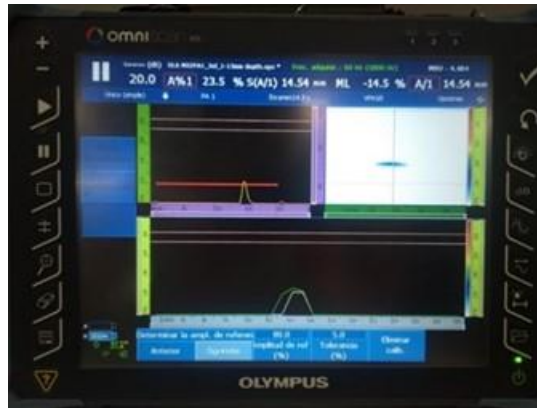
Para el primer ajuste se va a referenciar la amplitud del equipo a la cual se van a normalizar las leyes focales.

**Amplitud de referencia:** se ajusta a un valor de 80%

**Tolerancia:** se ajusta a un valor del 5%

Seguidamente de ajustados estos valores se procede a dar en “siguiente” para seguir con la calibración.

**Figura 59. Amplitud de referencia.**



**Ajustar sección:** Permite seleccionar el último elemento. Para la calibración de todas las leyes focales.

**Ultimo VPA:** Se ajusta al valor de 30, el máximo permitido para esta configuración.

Seguidamente de ajustados estos valores se procede a dar en “siguiente” para seguir con la calibración.

**Figura 60. Ajustar sección calibración**



**Ajustar puerta A en eco A:** Se posiciona la puerta A en el centro de la señal generada por el reflector como se muestra en la figura 61.

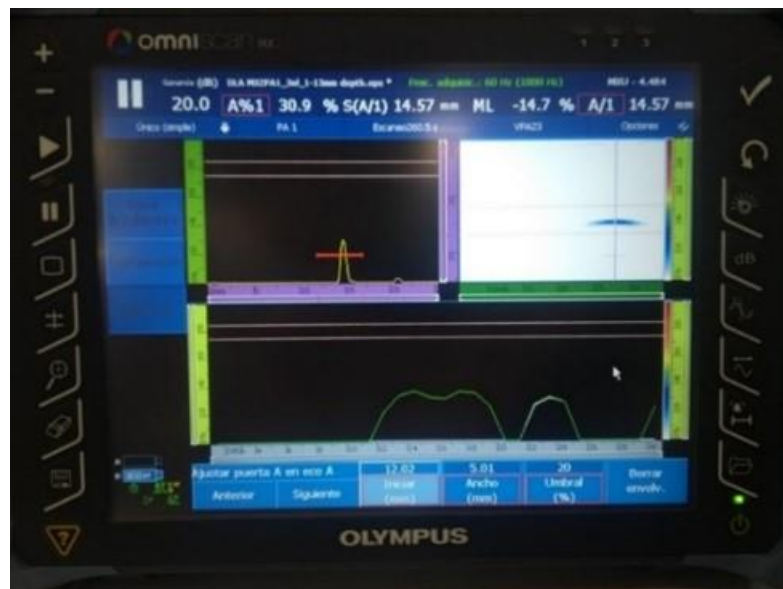
Para esto se debe modificar los siguientes parámetros.

**Iniciar:** Una vez se tenga el pico de señal generado se debe posicionar la puerta que el eco corte esta.

**Ancho:** Se debe procurar que el tamaño de la puerta A sea el suficiente para registrar todo el eco generado.

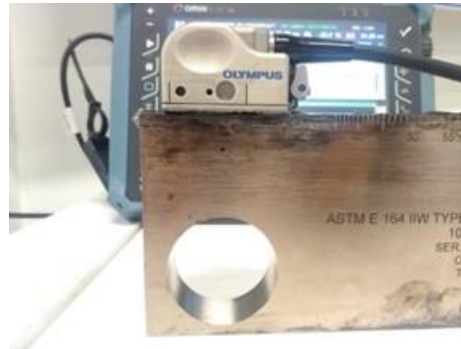
**Umbral:** se recomienda que tenga un valor entre 20%-25%

**Figura 61. Ajustar puerta A en eco A.**



La sonda debe estar ubicada de la siguiente manera sobre el bloque de calibración.

**Figura 62. Posicionamiento de la sonda**



Seguidamente de ajustada la puerta A correctamente se procede a dar en “siguiente” para seguir con la calibración.

**Ajuste de ganancia y compensación:** permite introducir valores de ganancia y compensación para aumentar las señales recibidas por el equipo.

**Compensación:** Dejar por defecto el valor establecido por el equipo.

**Ganancia:** Dejar por defecto el valor establecido por el equipo y que este ajuste este valor automáticamente.

Seguidamente de ajustados estos valores se procede a dar en “siguiente” para seguir con la calibración.

**Figura 63. Ajuste de ganancia y compensación**



**Calibrar y aceptar:** Deslice la sonda lentamente como se muestra en la imagen hacia adelante y hacia atrás sobre el bloque de calibración, para generar la envolvente.

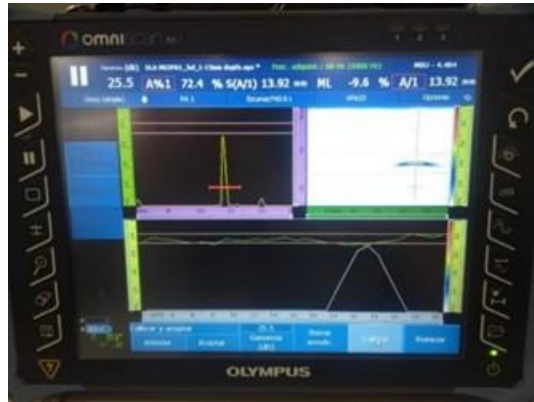
**Figura 64. Sonda sobre el bloque de calibración**



A medida que vaya desplazando la sonda sobre el bloque se va a ir generando la envolvente, si la envolvente queda por encima o por debajo del rango establecido proceda a dar en calibrar para que el equipo ajuste la ganancia automáticamente y nuevamente genere la envolvente repita este proceso las veces que sea necesario, con una envolvente uniforme para todos los elementos dentro del rango establecido,

por última vez seleccione “calibrar” para que el equipo establezca la ganancia optima, genere nuevamente la envolvente y seguidamente acepte la envolvente generada seleccionando “aceptar”.

**Figura 65. Envolvente para calibración de sensibilidad.**



### **Calibración de velocidad**

La calibración de velocidad se realiza para obtener la velocidad real de las ondas de ultrasonido en el material a inspeccionar, la cual depende de la densidad y elasticidad propia del material.

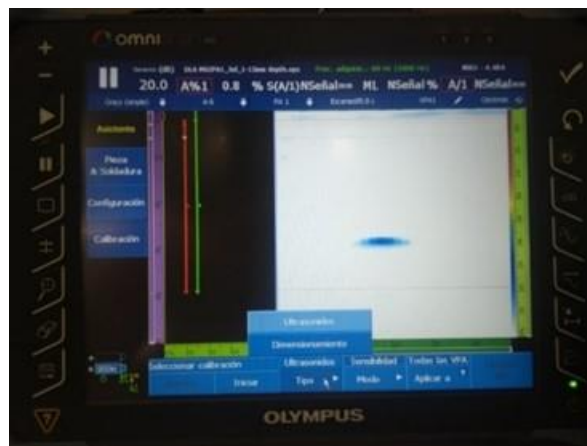
En la Figura 66 se muestran los submenús que se va a desplegar para seleccionar los parámetros de ajuste.

**Figura 66. Interfaz para el inicio de la calibración de velocidad**



En el submenú “TIPO” se selecciona “**ultrasonidos**” como se muestra en la Figura 67.

**Figura 67. Submenú TIPO.**



En el submenú “MODO” se selecciona “**Velocidad**” como se muestra en la Figura 68.

**Figura 68. Submenú MODO**



### **Ajustar profundidad 1 y 2**

**Tipo de eco:** Para el tipo de eco se selecciona “profundidad” y se introducen los valores del radio 1 y 2 del en las ranuras correspondientes (10 mm; 20 mm).

Seguidamente de ajustados estos valores se procede a dar en “siguiente” para seguir con la calibración.

**Figura 69. Tipo de eco.**



**A scan.**

**VPA:** Permite seleccionar el elemento en el cual se van a detectar las fallas.

**Ganancia:** Amplia la señal, obtenida por el equipo, se recomienda dejar el valor tomado por el equipo en la calibración de sensibilidad.

**Iniciar y rango:** Permiten ajustar el rango del eje de ultrasonido.

Seguidamente de ajustados estos valores se procede a dar en “siguiente” para seguir con la calibración.

**Figura 70. A- scan**



Luego de ajustado el A-Scan se ubica la zapata sobre el bloque de calibración como se muestra en la Figura 71.

**Figura 71. Posicionamiento de suela.**



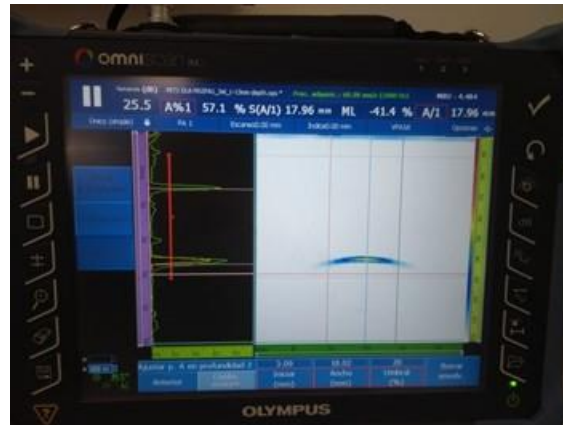
Se ajusta la puerta A para que corte los 2 valores de profundidad establecidos como se ve en la Figura 72 y la figura 73.

Se mueve la suela hacia delante y hacia atrás hasta que detecte la primera señal, se visualiza el agujero en el s-scan y el eco en el A-scan, luego de detectado se selecciona configurar posición y se repite el procedimiento para la profundidad 2.

**Figura 72. Eco profundidad 1.**

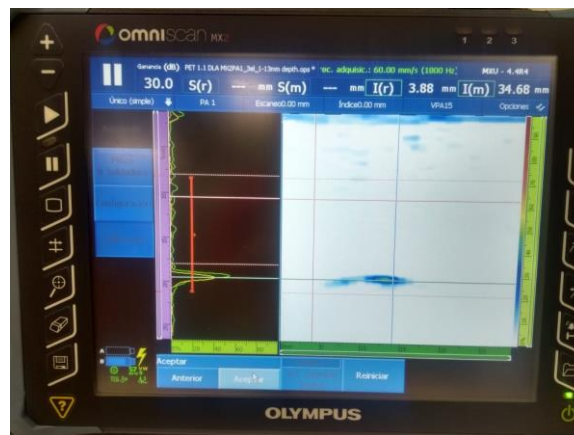


**Figura 73. Eco profundidad 2.**



Luego de configurar la segunda posición el equipo calcula el tiempo que le toma ir de la primera onda a la segunda onda y así calcula la velocidad de onda en el material de inspección.

**Figura 74. Velocidad de inspección**



Si la velocidad calculada por el Omniscan es correcta se continua con el procedimiento de calibración de lo contrario se debe reiniciar la calibración de velocidad y repetir los pasos anteriormente descritos. Para el ensayo la velocidad

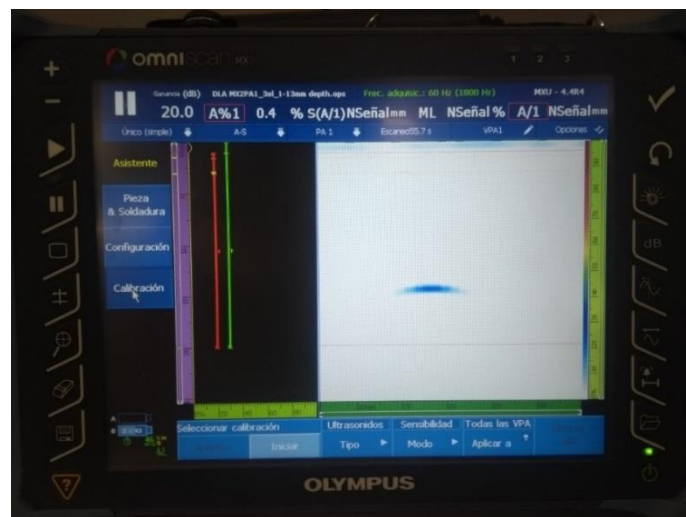
obtenida fue de  $5895,5 \frac{m}{s}$  la cual es coherente a los valores de tablas para ondas longitudinales en aceros.

**Cumplidos estos pasos se procede a dar en “aceptar”.**

### **Calibración de retardo de suela.**

En la figura 75 se muestran los submenús que se va a desplegar para seleccionar los parámetros de ajuste.

**Figura 75. Interfaz para el inicio de la calibración de retardo de suela**



En el submenú “TIPO” se selecciona “ultrasonidos” como se muestra en la figura 76.

Figura 76. Submenú TIPO.



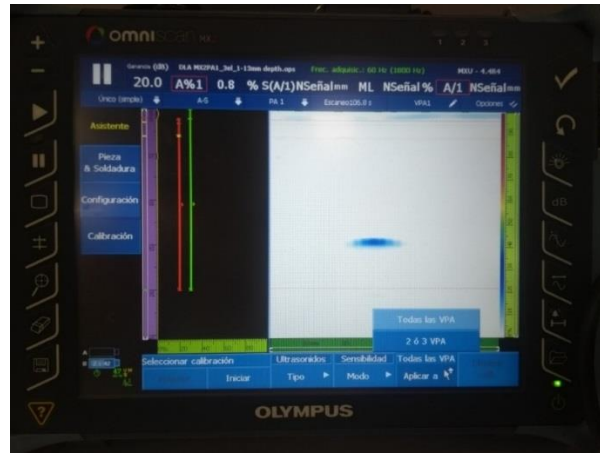
En el submenú “MODO” se selecciona “Retardo de suela” como se muestra en la figura 77.

Figura 77. Submenú MODO



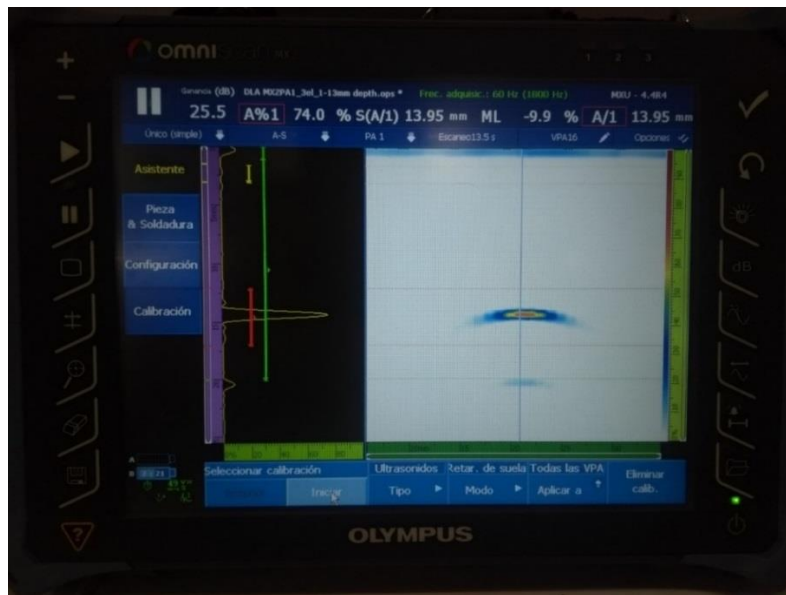
En el submenú “APLICAR A” se selecciona “Todos los ángulos” como se muestra en la figura 78.

Figura 78. Submenú APLICAR A.



Cumplidos estos pasos se procede a dar en “iniciar”. Como se muestra en la figura 79.

Figura 79. Inicio de calibración retardo de suela.



**Ajustar profundidad A:** Se va a calibrar retardo de suela empleando el mismo agujero que se usó para calibrar sensibilidad.

**Tipo de eco:** Se selecciona el tipo de reflector que se va a usar para la calibración se dispone de una profundidad de 15 mm

**Tolerancia:** Se establece el rango en el cual se encuentre la envolvente.

Seguidamente de ajustada la profundidad A correctamente se procede a dar en “siguiente” para seguir con la calibración.

**Figura 80. Menú para ajuste de profundidad A.**

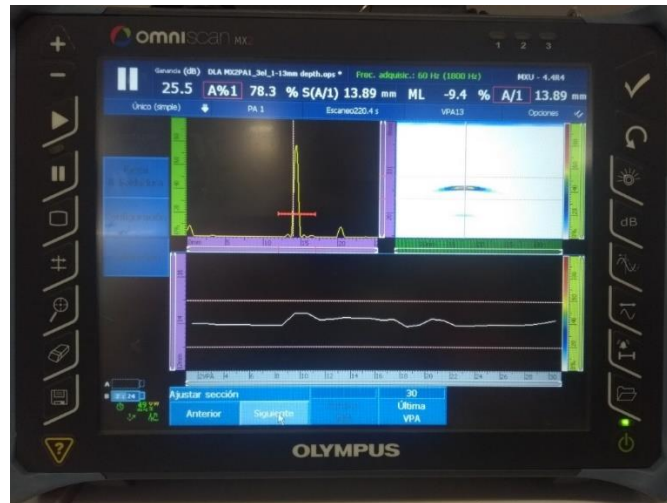


**Ajustar sección:** Permite seleccionar el último elemento. Para la calibración de todas las leyes focales.

**Ultimo VPA:** Se ajusta al valor de 30, el máximo permitido para esta configuración.

Seguidamente de ajustados estos valores se procede a dar en “siguiente” para seguir con la calibración.

**Figura 81. Ajustar sección retardo de suela**



**Ajustar puerta A en eco A:** Se posiciona la puerta A en el centro de la señal generada por el reflector como se muestra en la figura 82.

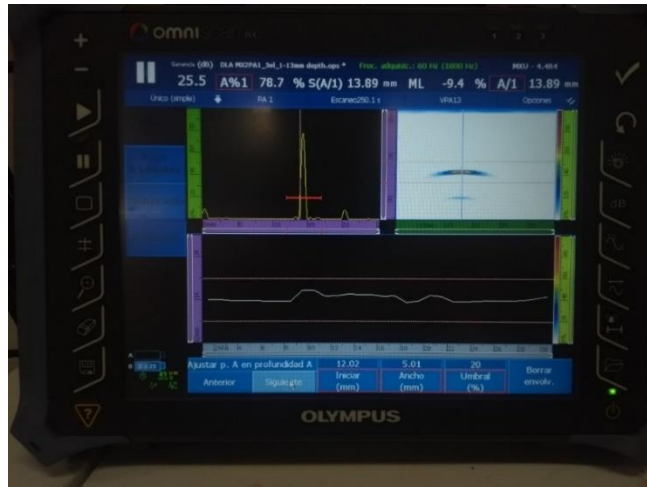
Para esto se debe modificar los siguientes parámetros.

**Iniciar:** Una vez se tenga el pico de señal generado se debe posicionar la puerta que el eco corte esta.

**Ancho:** Se debe procurar que el tamaño de la puerta A sea el suficiente para registrar todo el eco generado.

**Umbral:** se recomienda que tenga un valor entre 20%-25%

**Figura 82. Ajustar puerta A en profundidad A**



La sonda debe estar ubicada de la siguiente manera sobre el bloque de calibración.

**Figura 83. Posicionamiento de la sonda retardo de suela.**

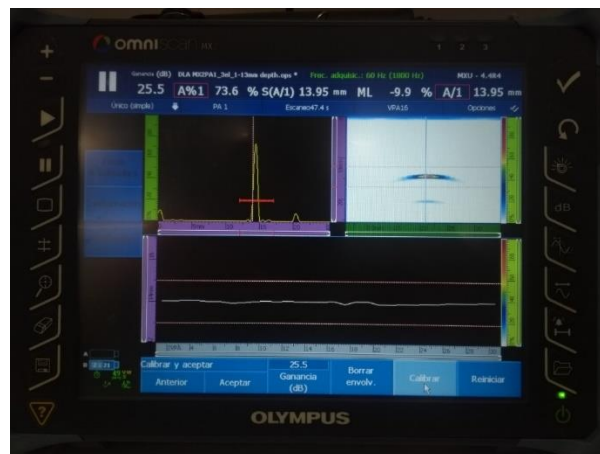


Seguidamente de ajustada la puerta A correctamente se procede a dar en "siguiente" para seguir con la calibración.

**Calibrar y aceptar:** Deslice la sonda lentamente como se muestra en la imagen hacia adelante y hacia atrás sobre el bloque de calibración, para generar la envolvente. Como se muestra en la figura 83.

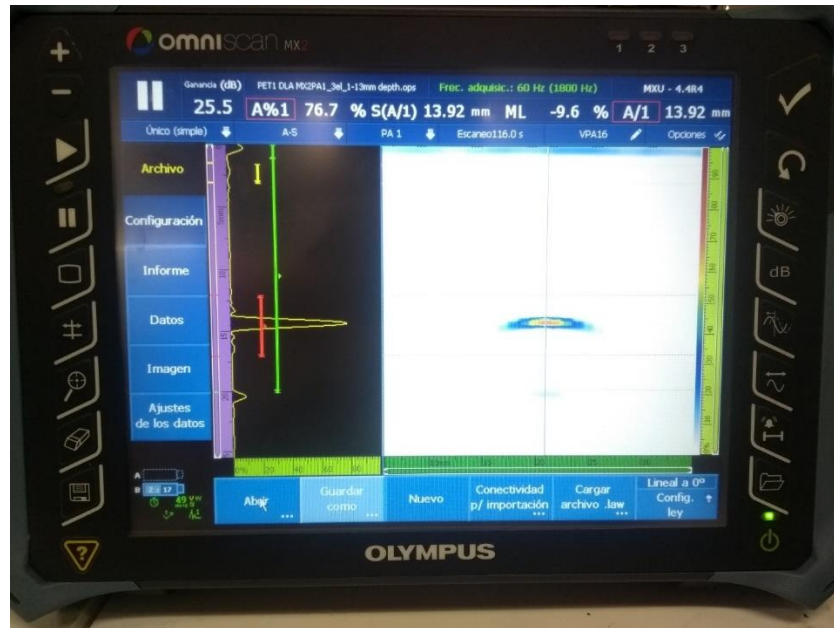
A medida que vaya desplazando la sonda sobre el bloque se va a ir generando la envolvente, si la envolvente queda por encima o por debajo del rango establecido proceda a dar en calibrar para que el equipo ajuste la ganancia automáticamente y nuevamente genere la envolvente repita este proceso las veces que sea necesario, con una envolvente uniforme para todos los elementos dentro del rango establecido, por última vez seleccione “calibrar” para que el equipo establezca la ganancia optima, genere nuevamente la envolvente y seguidamente acepte la envolvente generada seleccionando “aceptar”.

**Figura 84. Calibrar y aceptar retardo de suela**



Luego de finalizado el proceso de calibración la señal generada por el agujero utilizado para la calibración de sensibilidad y retardo de suela debe verse de una forma clara y precisa, para dar por concluida la correcta calibración del equipo. Como se muestra en la figura 85.

Figura 85. Resultado de la calibración



## 7. CONFIGURACION VERSAMOUSE PARA INSPECCION DE ESPESORES.

Para la adquisición de datos en inspección de espesores se empleará el escáner VersaMOUSE que está diseñado para escaneos codificados lineales con una sonda de matriz en fase. El botón de indexación integrado lo hace el indicado para aplicaciones de mapeo en 2-D como lo es una inspección de corrosión. El VersaMOUSE realiza el escaneo codificado de una línea y seguido se la indexación de la posición en la dirección perpendicular, echo esto se realiza el escaneo de otra línea a inspeccionar y se adiciona al escaneo anterior, este proceso se repite para elaborar el mapa 2-D completo del área de inspección.

**EQUIPO VERSA MOUSE:** Ver figura 86.

**Figura 86. Escáner VersaMOUSE.**



**Figura 87. Cable codificado**



**Figura 88. Yugo PA ajustable**



## **7.1 MONTAJE DEL VERSAMOUSE**

**Paso 1:** Se procede a ensamblar el VersaMOUSE, para realizar el mapeo 2-D requerido para el análisis de corrosión y pérdida de espesor.

Para comenzar se identifica el punto de conexión del cable codificador en el Omniscan mx2.

**Figura 89. Punto de conexión Omniscan MX2**



Se procede a conectar el cable en dicho puerto. Las líneas indicativas rojas en el equipo y el cable deben coincidir.

**Figura 90. Conexión cable codificador – Omniscan MX2**



**Paso 2:** Se procede a conectar el cable codificador con el escáner VersaMOUSE

**Figura 91. Punto de conexión escáner VersaMOUSE**



Y luego se procede a conectar el cable en dicho puerto. Las líneas indicativas rojas en el escáner y el cable deben coincidir.

**Figura 92. Conexión cable codificador – Escáner VersaMOUSE**



**Paso 3:** Se posición la sonda “7.5 DL32-REX1-HC” y el yugo PA ajustable como se muestra en la figura 93.

**Figura 93. Montaje VersaMOUSE-yugo PA ajustable-sonda**



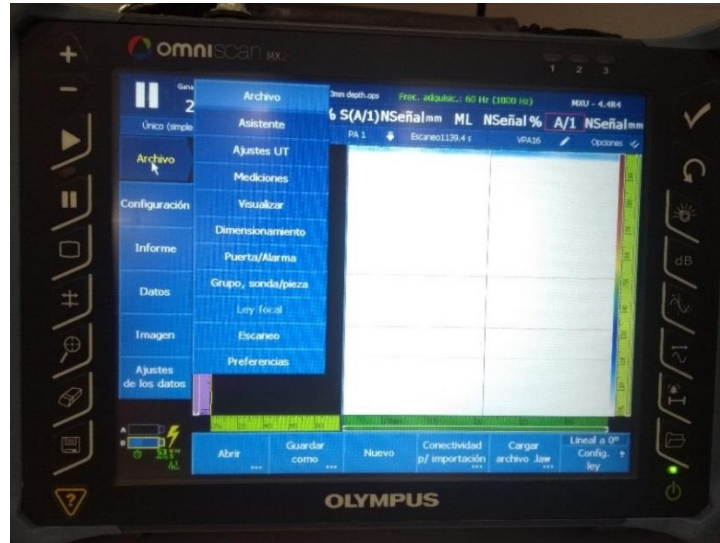
## **7.2 PASOS PARA LA CONFIGURACIÓN DEL EQUIPO VERSAMOUSE (PERDIDA DE ESPESOR Y CORROSIÓN)**

Luego de haber ensamblado correctamente el VersaMOUSE con la sonda se procede a realizar la configuración del equipo Omniscan MX2 para la inspección de espesores y corrosión.

**Paso 1:** Se va a configurar el equipo para realizar el análisis de corrosión y pérdida de espesor con el software especificado (DLAMX2PA1\_3el\_1-13mmdepth.ops). Este software viene dado por el fabricante del equipo Omniscan.

Para comenzar con la configuración se sigue la siguiente ruta archivo-escaneo como se muestra en la figura 94.

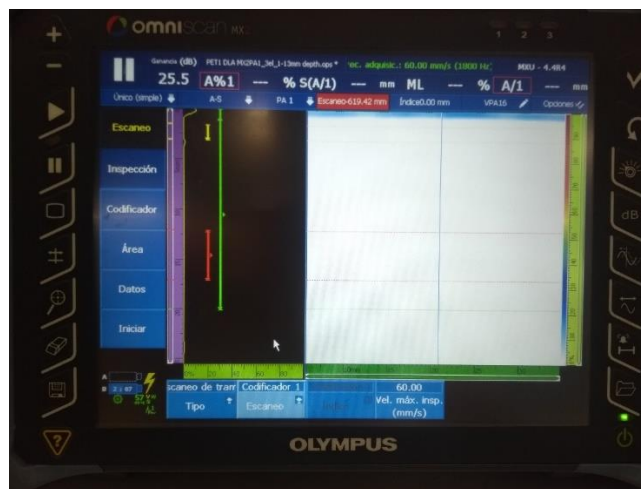
**Figura 94. Menú desplegable ventana archivo**



### **Inspección.**

En la figura 95 se muestran los submenús que se va a desplegar para seleccionar los parámetros de ajuste.

**Figura 95. Interfaz para el inicio de la configuración del VersaMOUSE**



En el sub menú “TIPO” se selecciona “Escaneo de tramo”

En el sub menú “Escaneo” se selecciona el “codificador 1”.

Ya que se seleccionó “escaneo de tramo” el VersaMOUSE por defecto va a funcionar con 2 codificadores como ya se mencionó anteriormente, el codificador 2 va a operar a la máxima velocidad de inspección que define el equipo por defecto. Véase figura 95.

**Cumplidos estos pasos se procede a seleccionar en el menú “Codificador”.**

**Codificador.**

**Figura 96. Sub menú codificador 1**

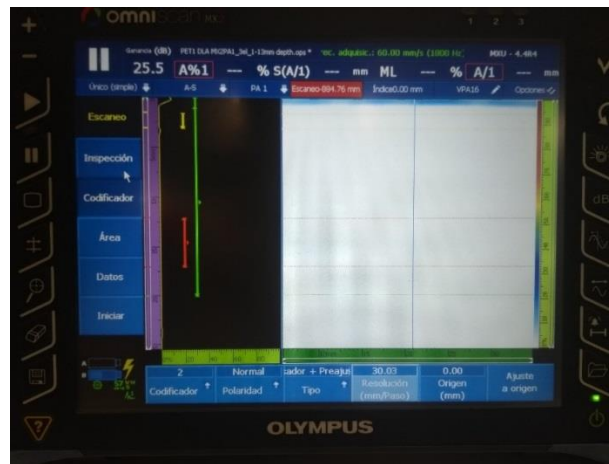


En el sub menú codificador se selecciona primero “1” este codificador será el encargado de llevar la posición de la sonda a través del eje de escaneo. (Escáner VersaMOUSE).

En el sub menú “POLARIDAD” se selecciona “normal”; En el sub menú “TIPO” se selecciona “cuadratura”; la resolución del VersaMOUSE es de  $8.4 \frac{\text{paso}}{\text{mm}}$  .

Al finalizar se debe visualizar como se muestra en la figura 97.

**Figura 97. Sub menú codificador 2**



Seguido se selecciona en el sub menú codificador “2” Este codificador será el encargado de darnos la posición de la sonda en el mapeo 2-D.

En el sub menú “POLARIDAD” se selecciona “normal”; En el sub menú “TIPO” se selecciona “pulsador + pre ajustador”; la resolución del codificador 2 corresponde a la sonda que para este caso es de  $30,03 \frac{\text{mm}}{\text{paso}}$  .

Al finalizar se debe visualizar como se muestra en la figura 98.

**Cumplidos estos pasos se procede a dar en “Área”.**

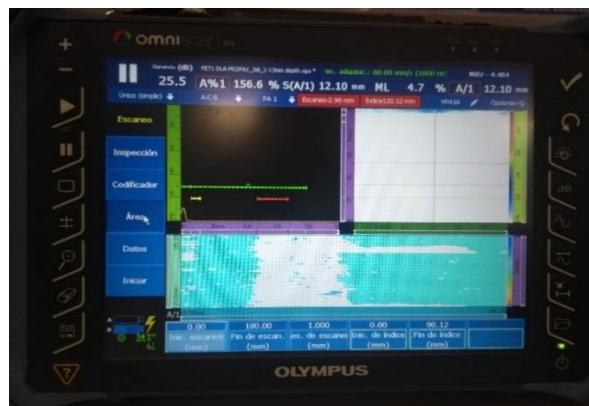
## Área.

Los sub menús del área se ajustan de acuerdo al tamaño de la pieza a inspeccionar con una resolución de un dato por cada milímetro.

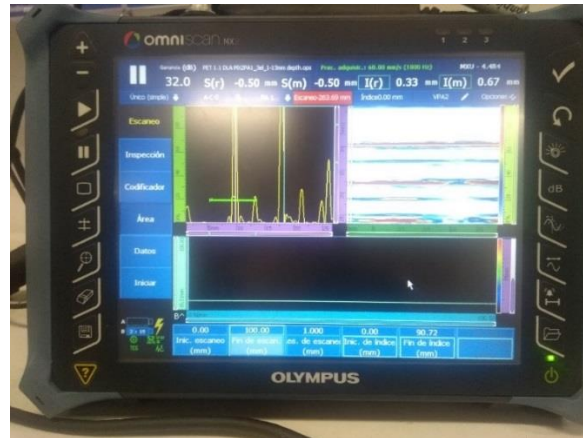
Se debe considerar que los ejes que se van a utilizar son el eje de escaneo y el eje índice, el tamaño del eje de escaneo se ajusta a los requerimientos necesarios para la inspección, el eje índice se modifica de acuerdo a los tramos que se van a realizar, dependen de la resolución del codificador dos.

Para el caso de las piezas a inspeccionar se va a realizar una configuración para la pieza 1 (perdida de espesor) y otra para la pieza 2 (corrosión). Para la pieza 1 se deben ajustar los valores como se ve en la figura 99 y para la pieza 2 se deben ajustar los valores como se ve en la figura 98.

**Figura 98. Ajuste área pieza 1**



**Figura 99 Ajuste área pieza 2**



**Cumplidos estos pasos se procede a dar en “Datos”.**

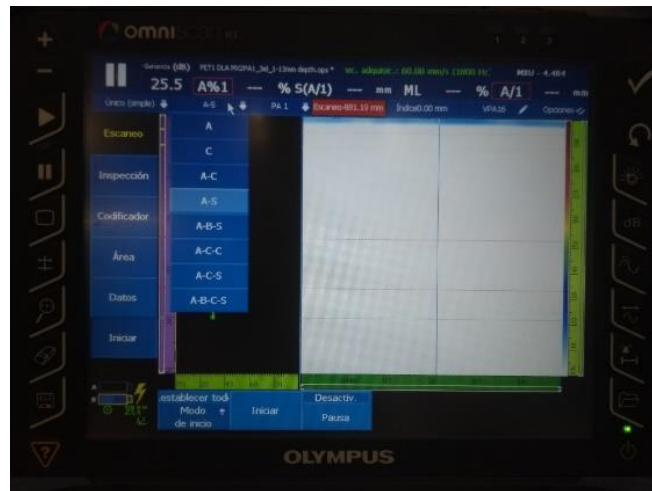
### **Datos.**

Este menú nos permite seleccionar en donde queremos guardar los datos por defecto se guardan en la tarjeta SD del Omniscan.

### **Iniciar.**

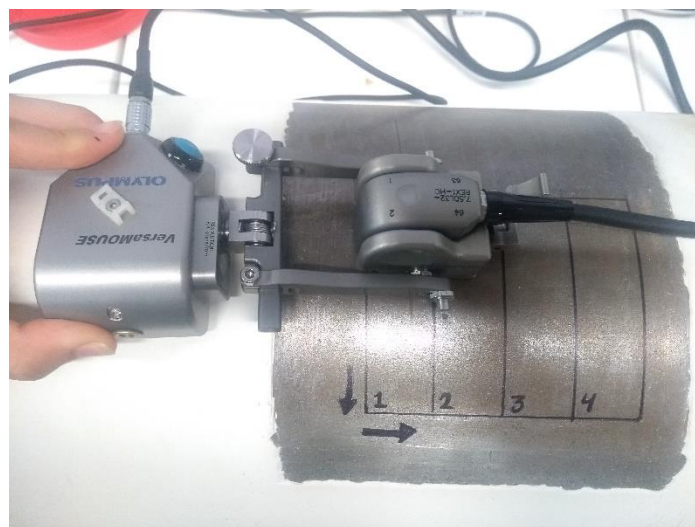
Para iniciar con el escaneo es necesario tener activado el C-SCAN de no tenerlo activo se procede a realizar la acción que se ve en la figura 100 y seleccionar la opción A-C-S

**Figura 100. Visualización A-C-S SCAN**



Para iniciar deben posicionar el VersaMOUSE con la sonda sobre la pieza ya a inspeccionar como se muestra en la figura 101, del correcto posicionamiento de la sonda en cada barrido dependerá del éxito del mapeo 2-D que resultará al final, una vez posicionada la sonda dar en <iniciar>.

**Figura 101. Posicionamiento del VersaMOUSE**



Las flechas indican el sentido en que se debe desplazar el VersaMOUSE sobre la pieza a inspeccionar, la sonda tiene 2 indicativos que corresponden a los 30,03 mm/paso estas 2 líneas de indicación deben ir a medida que se desplaza el VersaMOUSE por la pieza sobre las márgenes de cada trazado, como se ve en la figura x, se inicia el escaneo posicionando la sonda al inicio del margen y se termina el escaneo al terminar totalmente el margen, luego de esto se debe posicionar correctamente en el siguiente tramo y dar clic en el botón de indexación del VersaMOUSE.

NOTA: el VersaMOUSE debe ser levantado de la pieza de inspección una vez término el primer trazado y llevado hasta la segunda posición y así sucesivamente.

**Figura 102. Posicionamiento de la sonda**



La metodología de aplicación de la prueba de ultrasonido para SOLDADURA se encuentra en el ANEXO B.

## 8. RESULTADOS

### 8.1 PERDIDA DE ESPESOR.

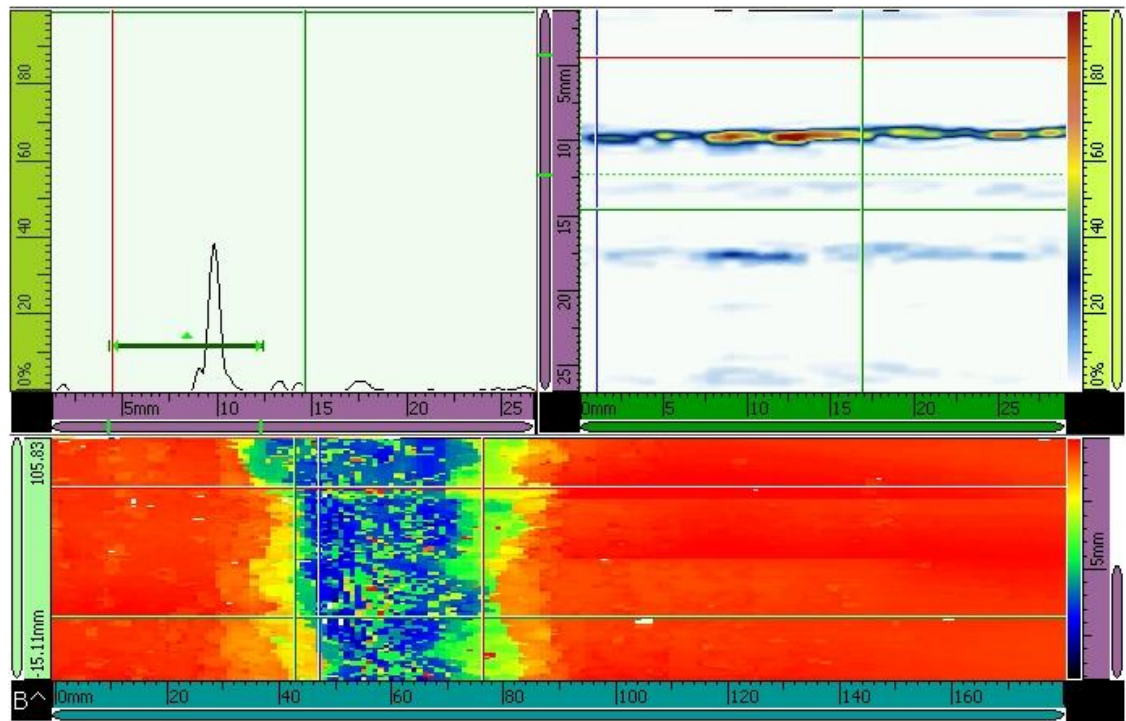
En la figura 104 podemos observar cómo se logró ubicar e identificar el sector presente en la tubería que presenta mayor desgaste, presentando una significativa reducción del espesor del tubo en este tramo de inspección. Mediante la escala de colores (escala derecha) del C-Scan podemos deducir fácilmente la profundidad que presentan estas fallas. Así como la posición y el ancho aproximado de cada error es fácilmente deducido gracias a las escalas en el eje de índice y el eje de escaneo.

#### **Inspección espesor tubería de acero al carbono API 5L X42**

El área tomada fue de 180 mm eje escaneo y aproximadamente 120 mm es decir 4 saltos sobre el eje índice con una resolución de 1 dato por mm. La resolución del codificador dos es determinada por la configuración de las leyes focales lo cual es de 30.03 mm.

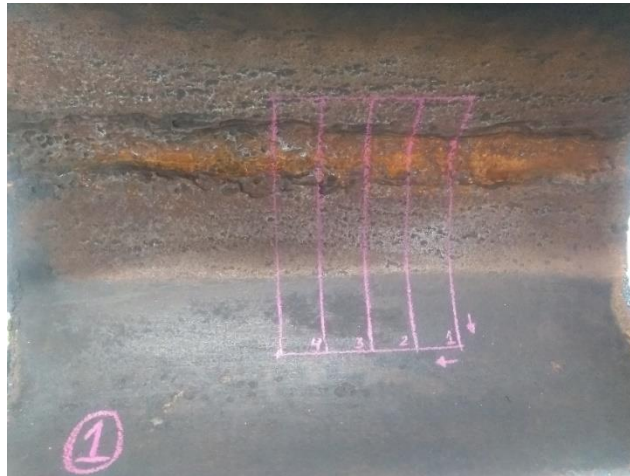
En la figura 104 se aprecia un tramo considerable de pérdida de espesor como se evidencia en el C-Scan se encuentra un espesor mínimo de 3 mm como lo indica la escala de colores por lo que se puede decir que el tubo presenta en esta zona una pérdida de espesor equivalente a 6,27 mm ya que su espesor nominal es de aproximadamente 9,27 mm dicha sección presenta un ancho aproximado de 3 cm.

**Figura 103. Resultados de inspección de espesor Tubería API 5L X42.**



La pieza que se empleó para la inspección de pérdida de espesor, como se puede ver en la figura 105 presenta un tramo de avanzado daño por factores corrosivos, como se evidencio en la inspección por ultrasonido.

**Figura 104. Tubo para inspección de espesor Tubería API 5L X42.**



**NOTA:** Para la visualización de los tres escáneres deben estar activas las 3 puertas del Omniscan MX2 (A, I, B)

## **8.2 POROSIDAD**

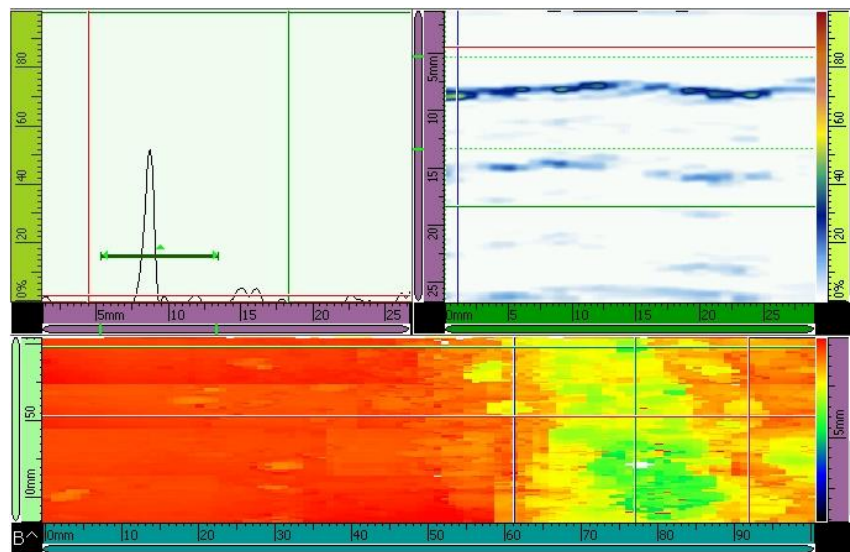
En la figura 106 podemos observar cómo se logró ubicar e identificar varios sectores presentes en la tubería que presentan mayores irregularidades en su superficie interna, presentando una significativa reducción del espesor del tubo en este tramo de inspección. Mediante la escala de colores (escala derecha) del C-Scan podemos deducir fácilmente las diferentes profundidades que se presentan. Así como la posición y el ancho aproximado de cada error es fácilmente deducido gracias a las escalas en el eje de índice y el eje de escaneo, dado que inicialmente se consideró un área grande de inspección, la resolución del equipo disminuye, lo que nos hizo elaborar

### Inspección corrosión tubería de acero al carbono API 5L X42

El área tomada fue de 100 mm eje escaneo y aproximadamente 120 mm es decir 4 saltos sobre el eje índice con una resolución de 1 dato por mm. La resolución del codificador dos es determinada por la configuración de las leyes focales lo cual es de 30.03 mm.

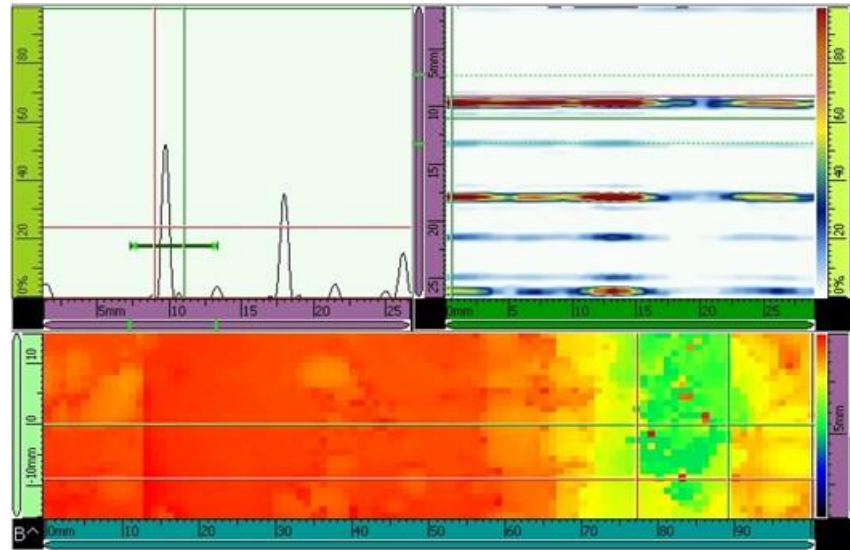
En la figura 106 se aprecia un tramo considerablemente afectado por la corrosión lo que nos indica que la pieza presenta un desgaste significativo en esta zona como lo indica la escala de colores, se realiza un análisis de cada tramo con el fin de detectar con mayor exactitud los lugares con mayor pérdida de pared de tubería.

**Figura 105. Resultados de inspección de corrosión Tubería API 5L X42.**



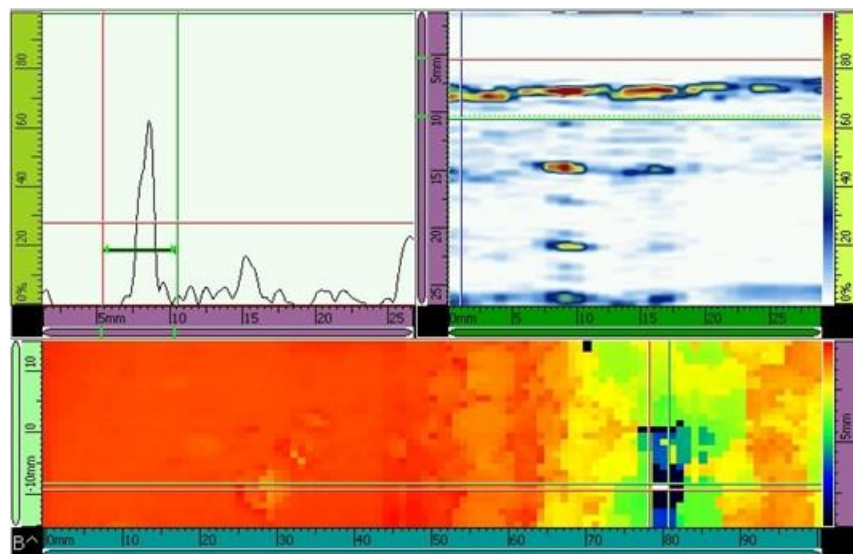
En el primer tramo el sector más afectado por la corrosión presenta un espesor de 5 mm, un ancho de 12 mm y un alto de 8 mm.

**Figura 106. Primer tramo**



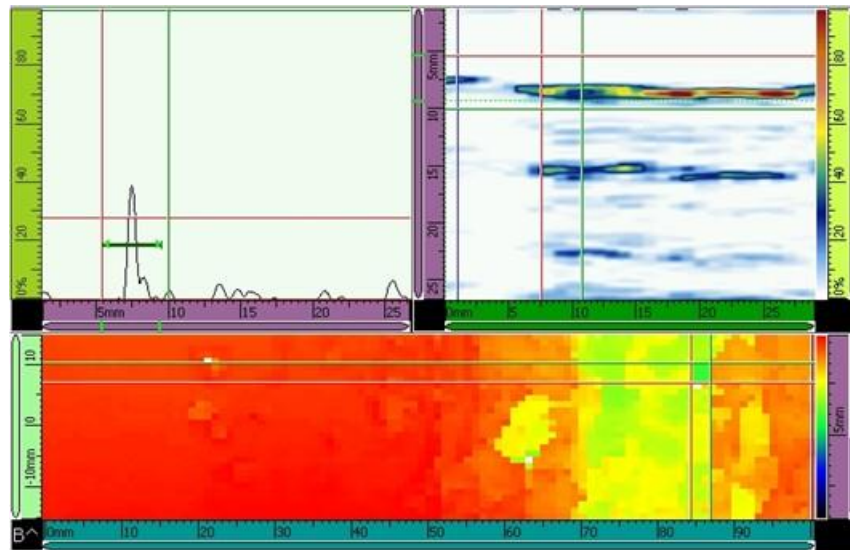
En el segundo tramo el sector más afectado por la corrosión presenta un espesor aproximado de 1mm notándose ya una perforación en la superficie del tubo, un ancho de 3 mm y un alto de 2 mm.

**Figura 107. Segundo tramo**



En el Tercer tramo el sector más afectado por la corrosión presenta un espesor aproximado de 6 mm, un ancho de 4 mm y un alto de 3 mm.

**Figura 108. Tercer tramo**



La exactitud de la ubicación y la resolución de cada defecto dependen en gran parte de la habilidad del operario del escáner VersaMOUSE ya que este debe pasar perfectamente alineado por las líneas trazadas.

La pieza que se empleó para la inspección de corrosión, como se puede ver en la figura 109 presenta en cada uno de los tramos el daño presentado por factores corrosivos, como se evidencio en la inspección por ultrasonido.

**Figura 109. Tubo para inspección de corrosión Tubería API 5L X42.**



### **8.3 SOLDADURA**

#### **Resultados de la inspección de soldadura en el tubo de acero 1020.**

Basados en la metodología planteada, se procede a realizar la inspección del tubo, utilizando la sonda 5L16 A10 y la cuña SA10 N55S. La inspección es realizada manualmente alrededor del cordón de soldadura en el tubo, identificando los lugares en los cuales se encuentran discontinuidades. Para las discontinuidades identificadas se realiza la toma de datos y se generan los siguientes resultados para el análisis.

Los resultados se pueden observar en la vistas A-Scan, S-Scan y Ray tracing. Se genera igual una tabla de datos basados en la norma AWS D1.1, Los cuales son usados para la clasificación de las discontinuidades y posteriormente analizarlas bajo los criterios de aceptación de la norma AWS D1.1 y la norma ICONTEC 4991.

Se debe tener en cuenta el espesor de la soldadura es de aproximadamente 12 mm.

**Discontinuidad identificada N°1.**

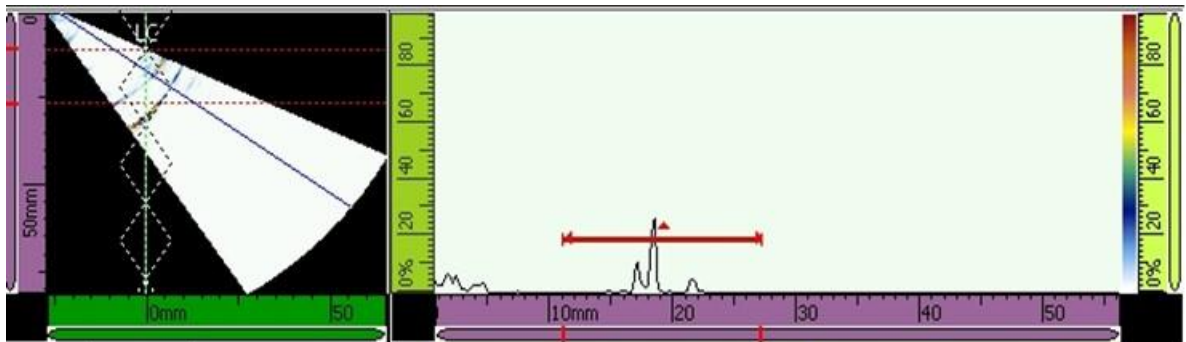
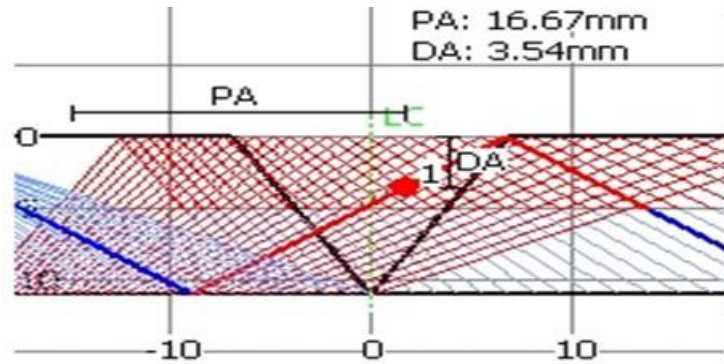
**Figura 110. Tubería de inspección de soldadura punto 1.**



**Tabla 6. Resultados discontinuidad N° 1**

N° indicación de defecto	Escaneo (mm)	Índice (mm)	Grupo	Canal	A%	DA^(mm)	PA^(mm)	SA^(mm)	AWS A (dB)	AWS C	AWS D	AWS CL
1	218	-15	PA1	55	27.4	3.54	16.67	32.18	34	1	13.3	D(70°)

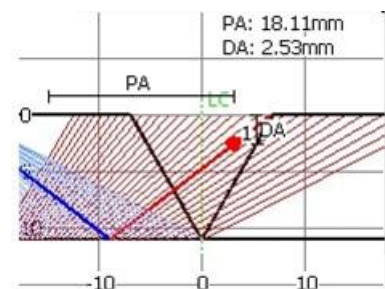
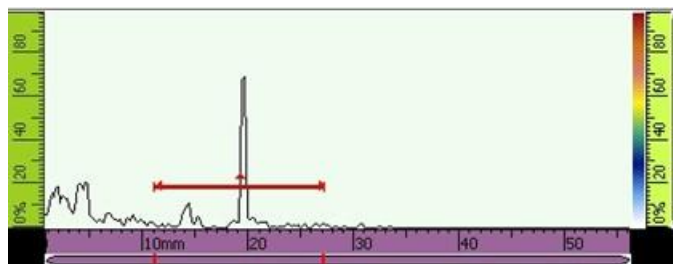
Figura 111. Vistas resultados discontinuidad N°1



Para la determinación de la longitud de la discontinuidad se aplica la norma AWS 6.31.2 Prueba del Haz de luz de Angulo.

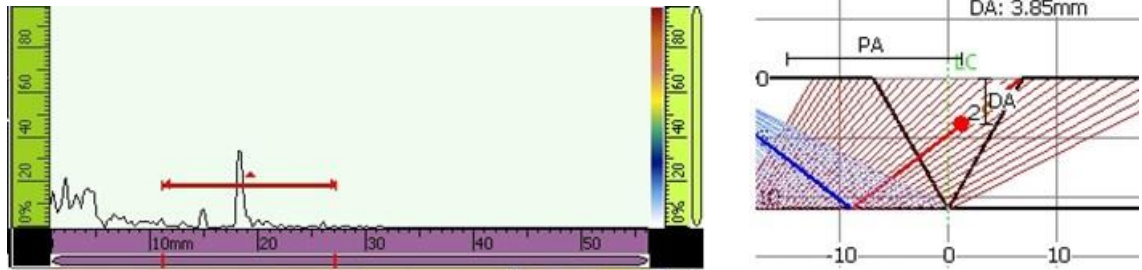
- Máxima amplitud registrada en la discontinuidad:

Figura 112. Maxima amplitud



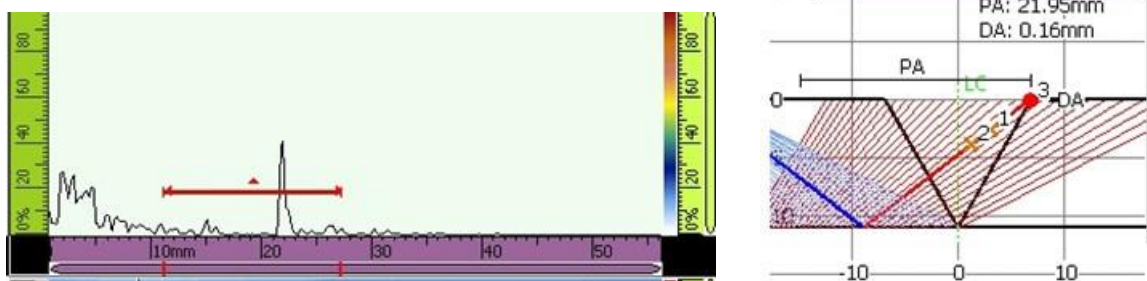
- 6 dB desplazados a la izquierda de la discontinuidad:

**Figura 113. 6 dB a la izquierda.**



- 6 Db desplazados a la derecha de la discontinuidad:

**Figura 114. 6 dB a la derecha.**



Apartir de los datos obtenidos usando la norma AWS 6.31.2 se determina el ancho y el alto de la discontinuidad.

**Tabla 7. Longitud de la discontinuidad N°1**

Amplitud	AWS A (Db)	DA^(mm)	PA^(mm)	Ancho (mm)	Alto (mm)
Máxima	39,2	2,53	18,11	5,73	3,69
6 dB Izquierda	45,5	3,85	16,22		
6 dB Derecha	45,5	0,16	21,95		

Para la determinación del ancho se usan los datos de PA^(mm), sumando la diferencia entre la amplitud máxima y la amplitud 6 Db a la izquierda y la amplitud máxima y la amplitud 6 Db a la derecha.

Para la determinación del alto se usan los datos de DA^(mm), sumando la diferencia entre la amplitud máxima y la amplitud 6 Db a la izquierda y la amplitud máxima y la amplitud 6 Db a la derecha.

Análisis de los resultados según la norma AWS D1.1:

1. Clasificación de la discontinuidad: según la tabla 6. En AWS CL la discontinuidad se reporta como clase D por lo tanto es una irregularidad menor.

NOTA: La clasificación observada en la tabla 6. Es reportada por el equipo de ultrasonido.

2. Usando la tabla 1. Criterios de aceptación.

- espesor de soldadura de 12 mm aproximadamente
- ángulo de palpador 70°
- AWS D = +13,3 de tabla 6.

Obtenemos discontinuidad clase D. irregularidad menor.

3. Según la norma ICONTEC 4991: Es una indicación de tipo volumétrica, posiblemente causada por un poro, generado durante el proceso de soldadura.

- Se considera defecto si Las indicaciones con un tamaño vertical (a través del espesor de pared del tubo) son mayores a  $\frac{1}{4}$  del espesor de pared de la tubería.

Espesor de pared de tubería = 11 mm

$\frac{1}{4}$  del espesor de la tubería = 2,75 mm

De tabla 7. Alto de la discontinuidad= 3,69 mm

Resultado: 3,69 mm > 2,75 mm. Se considera un defecto. Se rechaza.

- La indicación volumétrica individual (VI) será considerada defecto cuando la dimensión máxima de las indicaciones VI exceda 3 mm, tanto en ancho como en largo.

De tabla 7. Ancho de la discontinuidad= 5,73 mm

Resultado: 5,73 mm > 3 mm. Se considera un defecto. Se rechaza.

### **Discontinuidad identificada N°2.**

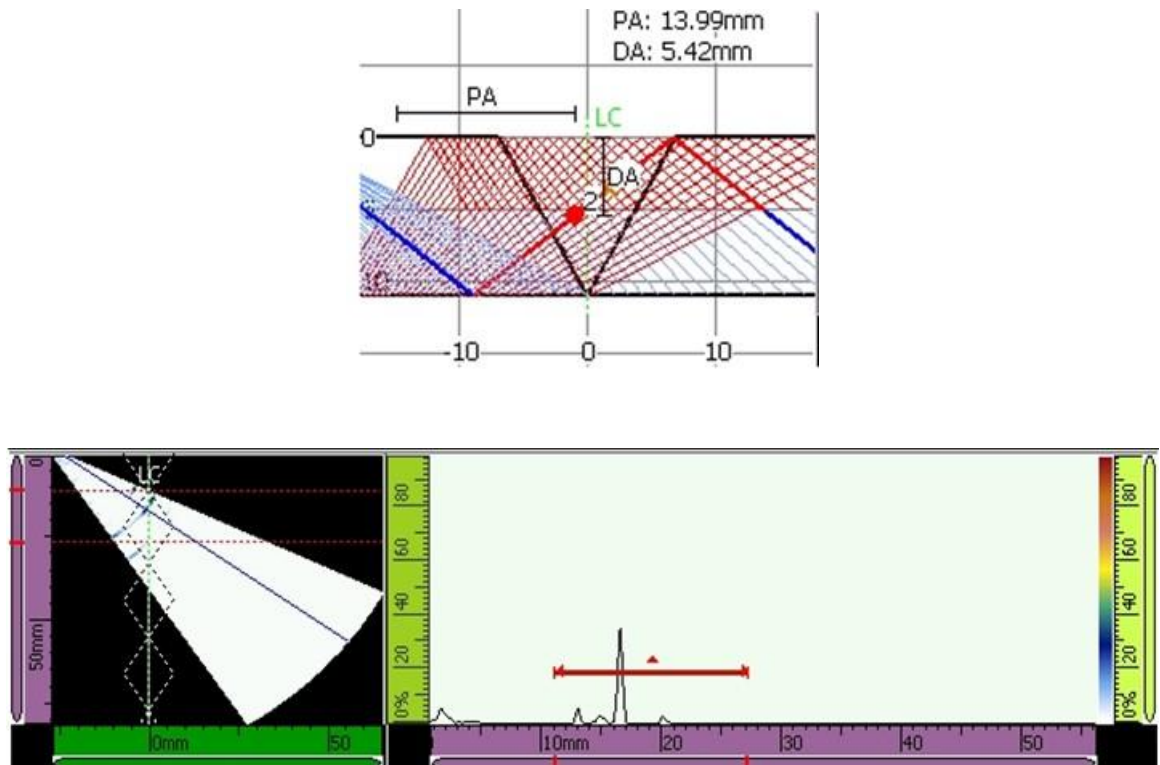
**Figura 115. Tubería de inspección de soldadura punto 2.**



**Tabla 8. Resultados discontinuidad N°2**

N° indicación de defecto	Escaneo (mm)	Índice (mm)	Grupo	Canal	A%	DA^(mm)	PA^(mm)	SA^(mm)	AWS A (Db)	AWS C	AWS D	AWS CL
2	373	-15	PA1	55	36.2	5.42	13.99	28.91	26.5	0	6.9	C(70°)

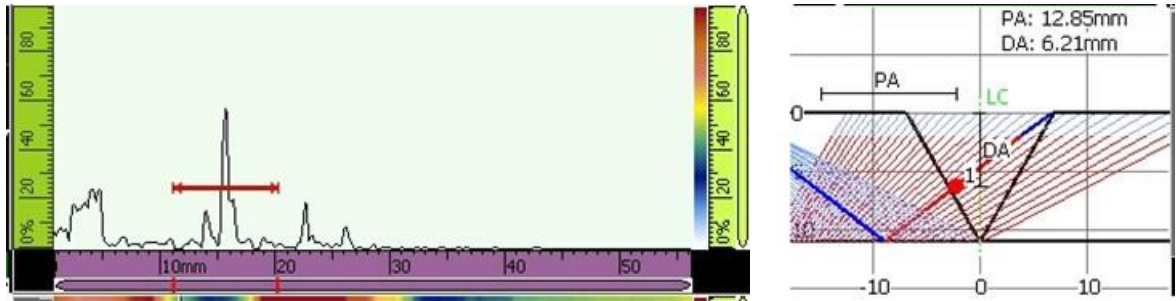
**Figura 116. Vistas resultados discontinuidad N°2**



Para la determinación de la longitud de la discontinuidad se aplica la norma AWS 6.31.2 Prueba del Haz de luz de Angulo.

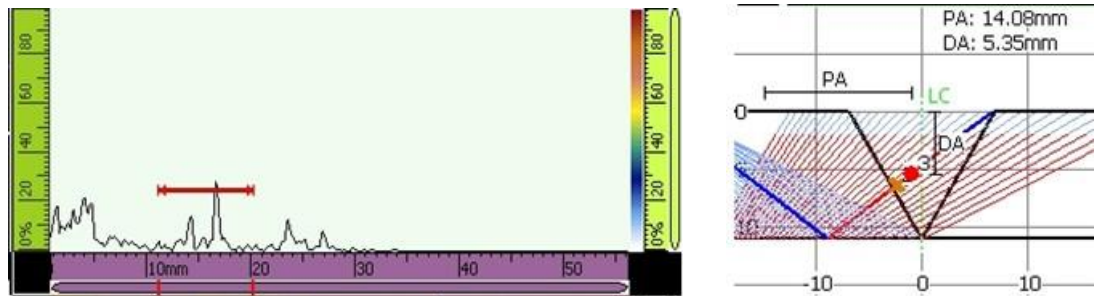
- Máxima amplitud registrada en la discontinuidad:

**Figura 117. Máxima amplitud**



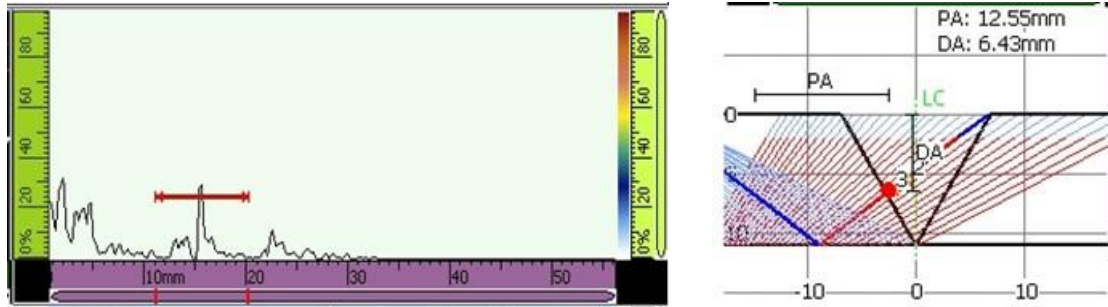
- 6 dB desplazados a la izquierda de la discontinuidad:

**Figura 118. 6 dB a la izquierda**



- 6 Db desplazados a la derecha de la discontinuidad:

**Figura 119. 6 dB a la derecha**



Apartir de los datos obtenidos usando la norma AWS 6.31.2 se determina el ancho y el alto de la discontinuidad.

**Tabla 9. Longitud de la discontinuidad N°2**

Amplitud	AWS A (Db)	DA^(mm)	PA^(mm)	Ancho (mm)	Alto (mm)
Máxima	39,3	6,21	12,85	1,53	1,08
6 dB Izquierda	46,5	5,35	14,08		
6 dB Derecha	45,3	6,43	12,55		

**Analisis de los resultados según la norma AWS D1.1:**

1. Clasificación de la discontinuidad: según la tabla 8. en AWS CL la discontinuidad se reporta como clase C por lo tanto es una irregularidad pequeña.

NOTA: La clasificación observada en la tabla 8 es reportada por el equipo de ultrasonido.

2. Usando la tabla 1. Criterios de aceptacion.

- espesor de soldadura de 12 mm aproximadamente
- angulo de palpador 70°
- AWS D = +6,9 de tabla 8.

Obtenemos discontinuidad aproximada en clase B muy cercana a la clasificacion C.

3. Según la norma ICONTEC 4991: Es una indicacion de tipo volumetrica, posiblemente causada por un poro, generado durante el proceso de soldadura.

- Se considera defecto si Las indicaciones con un tamaño vertical (a través del espesor de pared del tubo) son mayores a  $\frac{1}{4}$  del espesor de pared de la tubería.

Espesor de pared de tubería = 11 mm

$\frac{1}{4}$  del espesor de la tubería = 2,75 mm

De tabla 9. Alto de la discontinuidad= 1,08 mm

Resultado: 2,75 mm > 1,08 mm. No se considera defecto relevante.

- La indicación volumétrica individual (VI) será considerada defecto cuando la dimensión máxima de las indicaciones VI exceda 3 mm, tanto en ancho como en largo.

De tabla 9. Ancho de la discontinuidad= 1,53 mm.

Resultado: 1,53 mm < 3 mm. No se considera defecto relevante.

**Discontinuidad identificada N°3.**

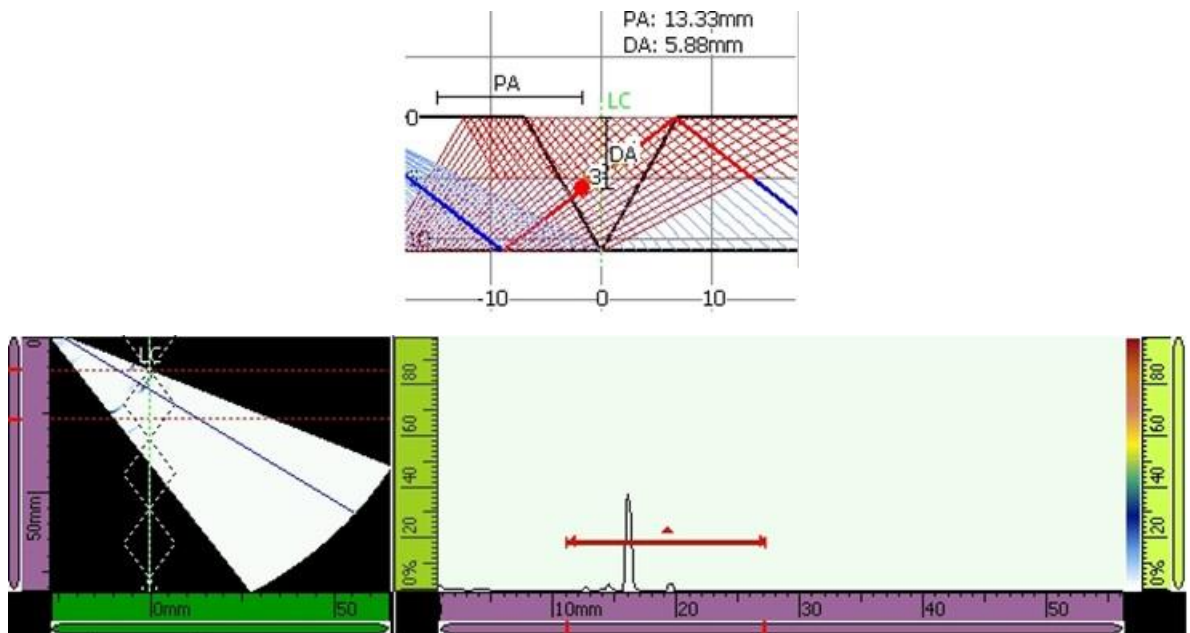
**Figura 120. Tubería de inspección de soldadura punto 3.**



**Tabla 10. Resultados discontinuidad N°3**

N° indicación de defecto	Escaneo (mm)	Índice (mm)	Grupo	Canal	A%	DA^(mm)	PA^(mm)	SA^(mm)	AWS A (Db)	AWS C	AWS D	AWS CL
3	39	-15	PA1	55	40.1	5,88	13,33	28,11	40	0	6,0	B(70°)

**Figura 121. Vistas de resultados discontinuidad N°3**



Apartir de los datos obtenidos usando la norma AWS 6.31.2 se determina el ancho y el alto de la discontinuidad.

**Tabla 11. Longitud de la discontinuidad N°3**

Amplitud	AWS A (Db)	DA^(mm)	PA^(mm)	Ancho (mm)	Alto (mm)
Máxima	36,3	3,28	12,23	=4,2	=2,85
6 dB Izquierda	42,5	5,6	13,81		
6 dB Derecha	41,3	2,75	14,85		

**Analisis de los resultados según la norma AWS D1.1:**

1. Clasificación de la discontinuidad: según la tabla 10. en AWS CL la discontinuidad se reporta como clase B por lo tanto es una irregularidad mediana.

NOTA: La clasificación observada en la tabla 10 es reportada por el equipo de ultrasonido.

2. Usando la tabla 1. Criterios de aceptación.

- espesor de soldadura de 12 mm aproximadamente
- ángulo de palpador 70°
- AWS D = +6 de tabla 10.

Obtenemos discontinuidad clase B

3. Según la norma ICONTEC 4991: Es una indicación trasnversal, posiblemente causada por fusión incompleta, generado durante el proceso de soldadura.

- Se considera defecto si Las indicaciones con un tamaño vertical (a través del espesor de pared del tubo) son mayores a ¼ del espesor de pared de la tubería.

Espesor de pared de tubería = 11 mm

$\frac{1}{4}$  del espesor de la tubería = 2,75 mm

De tabla 11. Alto de la discontinuidad = 2,85 mm

Resultado: 2,75 mm < 2,85 mm. Se considera defecto. Se rechaza.

## 9. CONCLUSIONES

- La metodología planteada para la inspección de tuberías permite de manera eficaz la identificación de las fallas tipo porosidades, pérdida de espesor por corrosión y discontinuidades en soldadura.
- Los resultados obtenidos usando la metodología hacen de esta una buena herramienta para ser aplicada en campo.
- El uso de las normas fue fundamental para poder determinar los parámetros a seguir antes de realizar la inspección y desarrollar la metodología, además de ser importantes para tener en cuenta los criterios de aceptación de las piezas basados en las tablas e información que nos brindan.
- La inspección por ultrasonido phased array es una avanzada herramienta, en comparación con el ultrasonido convencional ya que mediante esta técnica se puede barrer una zona más amplia de la pieza de ensayo permitiendo una mayor capacidad de detección de fallas propias de la pieza en la industria.
- El equipo presente en el laboratorio de vibraciones perteneciente a la escuela de ingeniería mecánica Omniscan MX2 es un equipo de alta precisión que permite la detección de fallas y una precisa caracterización de estas, cuando se ha calibrado de manera eficiente.
- La obtención de buenos resultados dependen directamente de una buena calibración, para esto es necesario el conocimiento adecuado de los equipos que se usan además de la habilidad del operador del equipo en el momento de la inspección.

## 10. RECOMENDACIONES

- El correcto uso, montaje y mantenimiento del equipo y sus componentes es fundamental para obtener el mejor desempeño de este.
- Ajustar las puertas, posicionarlas correctamente y ajustar la ganancia en el equipo nos brinda la capacidad de realizar un correcto dimensionamiento y localización de una falla presente en la pieza de inspección.
- El uso del gel conductor encargado de ser el medio acoplante en la superficie entre la zapata y sonda al igual que entre la zapata y superficie de la pieza a inspeccionar es fundamental para el correcto funcionamiento del equipo. Se debe usar antes de empezar la inspeccion entre las piezas y durante la inspección se debe aplicar con frecuencia, al terminar a todos los componentes que tienen contacto con el gel se les debe retirar y limpiarlos bien.
- Se deben seguir todas las indicaciones brindadas en los anexos de este proyecto para el correcto ensamble de las sondas, zapatas y versaMOUSE para así evitar daños en el equipo.
- El software para la inspección de corrosión y pérdida de espesores, esta guardado en la memoria del equipo, en caso de que se elimine se pueden obtener los archivos de la memoria que viene con la sonda.

## BIBLIOGRAFÍA

AMERICAN WELDING SOCIETY. Código AWS D1.1 para soldadura estructural, Sección 6 – Inspección, Parte F- Inspección por ultrasonidos. 2010.

CLAUDIO RIMOLDI, Luis Mariano Mundo. Catedra: Ensayos no destructivos por métodos de ultrasonidos. Universidad Nacional de la Plata. Buenos Aires. Argentina. 2012.

ECHEVARRIA, R. Universidad Nacional del Comahue. Facultad de Ingeniería. Laboratorio de Ensayos No Destructivos. Defectología. [En Línea] Comahue (Argentina): Universidad Nacional Del Camahue. 2002.

EDIGUER, Enrique; FRANCO, G. Tecnología ultrasónica y sus aplicaciones en la industria. Universidad Autónoma de Occidente. Departamento de Energética y Mecánica.

FUQUEN SANABRIA, Oscar Miguel. Metodología para la inspección de soldadura de aceros austeníticos mediante ultrasonido (técnica) phased array. [En línea]. (Recuperado en 12 julio de 2018.) 2014. Disponible en <https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/9857/Trabajo%20Final%20de%20Grado.pdf?sequence=1>

LABORATORIO DE TECNOLOGÍA DE MATERIALES. La prueba de ultrasonido, Proyecto papime clave: pe101110. 2010. p 25-30. Disponible en [http://olimpia.cuautitlan2.unam.mx/pagina\\_ingenieria/mecanica/mat/mat\\_mec/m6/PRUEBA%20DE%20ULTRASONIDO.pdf](http://olimpia.cuautitlan2.unam.mx/pagina_ingenieria/mecanica/mat/mat_mec/m6/PRUEBA%20DE%20ULTRASONIDO.pdf).

OLYMPUS. 2017. Phased Array testing: Basic Theory for industrial applications. Olympus NDT. [En línea]. (Fecha de consulta: 09 de septiembre 2019.) 2017. Recuperado en [https://www.olympus-ims.com/es/.downloads/download/?file=285216102&fl=en\\_US](https://www.olympus-ims.com/es/.downloads/download/?file=285216102&fl=en_US)

OLYMPUS. Advances in Phased Array ultrasonic technology. Olympus NDT. 2007. [En línea]. (Fecha de consulta: 22 noviembre de 2019). Disponible en: [https://www.olympus-ims.com/es/downloads/detail/?0\[downloads\]\[id\]=276824168](https://www.olympus-ims.com/es/downloads/detail/?0[downloads][id]=276824168).

ULTRASONIC TESTING LEVEL I. Non Destructive Testing –Service and Training NTD Level III (ASNT corporate partner).