

**DISEÑO DE UNA METODOLOGÍA NO DESTRUCTIVA PARA LA CAPTURA DIGITAL Y  
EL DIMENSIONAMIENTO EN 3D DE DISCONTINUIDADES EXTERNAS EN TUBERÍAS  
DE TRANSPORTE DE HIDROCARBUROS.**

**Ing. EDWARD YESITH MENDOZA GONZÁLEZ**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE  
TELECOMUNICACIONES  
GRUPO DE INVESTIGACIÓN CEMOS-GIMAT  
BUCARAMANGA  
2011**



**DISEÑO DE UNA METODOLOGÍA NO DESTRUCTIVA PARA LA CAPTURA DIGITAL Y  
EL DIMENSIONAMIENTO EN 3D DE DISCONTINUIDADES EXTERNAS EN TUBERÍAS  
DE TRANSPORTE DE HIDROCARBUROS.**

**Ing. EDWARD YESITH MENDOZA GONZÁLEZ**

Trabajo de Investigación presentado como requisito parcial para optar al título de Magíster  
en Ingeniería Electrónica.

**Director**

LUZ AMPARO QUINTERO ORTIZ, MSc.

**Profesar Titular**

**Co\_directores**

RODOLFO VILLAMIZAR MEJÍA, PhD.

**Profesor Titular**

GERARDO SANTOS CASTAÑEDA, MSc.

**Ingeniero Metalúrgico**

WILLIAM VILLAMIZAR SUAREZ, Dr.

**Quimico**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE  
TELECOMUNICACIONES  
GRUPO DE INVESTIGACIÓN CEMOS-GIMAT  
BUCARAMANGA**

**2011**

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a Dios por todas las metas alcanzadas hasta el momento, a mis padres y hermanos por su ejemplo, apoyo y motivación que siempre me han brindado. A mi directora Luz Amparo Quintero Ortiz por su dedicación y respaldo en el desarrollo de toda la investigación, al Dr. Jaime Enrique Meneses por su orientación, apoyo y enseñanza en el tema de reconstrucción tridimensional, a mi codirector Rodolfo Villamizar Mejía por sus aportes y sugerencias, al Ing. Gerardo Santos por su confianza y respaldo. A los estudiantes de pregrado: Adriana Catalina, Leydi Cristina, Elkin Yesid, Diego Armando y en especial a Diana Margarita por sus aportes, dedicación y compromiso con el trabajo de investigación.

A mis amigos y compañeros: Dorys Ramírez, Maribel Anaya, Carlos Pachón, Julián Herrera, Daniel Gómez, Wilmer Sandoval, Santiago Alférez, Leandro Ariza por sus comentarios, acompañamiento y apoyo moral durante todo este proceso de aprendizaje. Y a todas las personas que de una u otra forma aportaron en el desarrollo de este trabajo, pero que olvido mencionarlas.

## CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
INTRODUCCIÓN .....	14
1. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROBLEMA .....	15
1.1. OBJETIVOS DE LA TESIS .....	16
1.1.1. Objetivo general .....	16
1.1.2. Objetivos específicos .....	16
1.2. ESTRUCTURA DE LA TESIS .....	16
2. MARCO CONCEPTUAL .....	18
2.1 EVALUACIÓN DE LA CORROSIÓN EXTERNA EN TUBERÍAS .....	18
2.1.1 Principales parámetros usados en el análisis de la corrosión .....	19
2.2 ALGUNAS TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS EMPLEADAS EN LA EVALUACIÓN DE CORROSIÓN EXTERNA EN TUBERÍAS .....	20
2.2.1 Ultrasonido .....	20
2.2.2 Corrientes eddy .....	22
2.2.3 Radiografía industrial .....	24
2.2.4 Inspección visual .....	27
2.2.4.1 Sistemas de reconstrucción tridimensional: .....	28
3. METODOLOGÍA .....	37
3.1 SELECCIÓN DE LA TÉCNICA NO DESTRUCTIVA .....	37
3.2 ADQUISICIÓN Y PROCESAMIENTO DE SEÑALES .....	38
3.3 DISEÑO Y VALIDACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE RECONSTRUCCIÓN. .	39
3.4 ELABORACIÓN DEL DOCUMENTO FINAL .....	41
4. RESULTADOS Y ANÁLISIS .....	42
4.1 SELECCIÓN DE LA TÉCNICA NO DESTRUCTIVA .....	42

4.1.1 Prueba en laboratorio de las técnicas de ultrasonido y radiografía.....	44
4.1.1.1. Ultrasonido por inmersión: .....	45
4.1.1.2. Medición de discontinuidades a partir de radiografías digitalizadas .....	47
4.2 ADQUISICIÓN Y PROCESAMIENTO DE SEÑALES.....	48
4.2.1 Montaje del sistema de reconstrucción 3D .....	49
4.2.2 Calibración del sistema .....	51
4.2.3 Factor de conversión de pixeles a milímetro.....	54
4.3 METODOLOGÍA DE RECONSTRUCCIÓN .....	56
4.3.1 Ubicación del objeto a reconstruir.....	57
4.3.2 Proyección del patrón de franjas y captura de la imagen para cada corrimiento .....	58
4.3.3 Filtrado de las imágenes .....	60
4.3.4 Cálculo de la fase continua del objeto. ....	61
4.3.5 Conversión de fase en alturas .....	61
4.4 APLICACIÓN Y VALIDACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA. ....	62
4.4.1 Reconstrucción tridimensional de la superficie corroída de una tubería. ....	62
4.4.2 Medición de parámetros.....	65
4.4.2.1 Medida de profundidad de los huecos de la tubería reconstruida.....	69
4.4.2.2 Medida de la longitud del área corroída .....	72
4.4.3 Caracterización del sistema implementado.....	73
4.4.3.1 Determinación del área mínima distinguible: .....	73
4.4.3.2 Altura mínima que se puede resolver el sistema .....	76
5. CONCLUSIONES .....	79
5.1 APORTES.....	80
5.2 RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS .....	81
BIBLIOGRAFÍA.....	82

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Parámetros usados para el análisis de la corrosión. ....	19
Figura 2. Arreglo de 256 micro-bobinas. ....	23
Figura 3. Ubicación del arreglo de micro-bobinas sobre la tubería. ....	23
Figura 4. Mapa de profundidades de corrosión obtenido con el arreglo de micro-bobinas. Las unidades se presentan en cm. ....	24
Figura 5. Patrones tubulares con discontinuidades artificiales. ....	26
Figura 6. Límites de aplicación de la técnica TRT. ....	27
Figura 7. Sistema Óptico de proyección de Franjas. ....	30
Figura 8. Franjas proyectadas sobre el plano de referencia, a) sin objeto b) con objeto. ....	31
Figura 9. Imágenes de corrimiento de fase. ....	34
Figura 10. Fase del sistema de franjas, a) Fase con objeto b) Fase del plano de referencia sin objeto. ....	34
Figura 11. Desdoblamiento de fase. ....	35
Figura 12. Valores necesarios para la corrección de fase. ....	35
Figura 13. Fase continua del sistema de franjas. ....	36
Figura 14. Metodología propuesta. ....	37
Figura 15. Metodología de reconstrucción. ....	40
Figura 16. Probeta tubular. ....	44
Figura 17. Sistema de inmersión. ....	45
Figura 18. Ubicación de la probeta en la cuba de inmersión. ....	46
Figura 19. Perfiles de la probeta a) Discontinuidades externas b) Orificios. ....	46
Figura 20. Radiografía de la probeta, a) Fotografía b) Perfil. ....	48
Figura 21. Sistema óptico implementado. ....	50
Figura 22. Coordenadas del sistema implementado. ....	50
Figura 23. Esquemático de los desplazamientos en Z. ....	51

Figura 24. Proceso de calibración.....	52
Figura 25. Fase continua del plano de referencia en $Z=0$ .....	53
Figura 26. Imagen de la grilla de ajedrez.....	55
Figura 27. Metodología de reconstrucción.....	56
Figura 28. Patrón de franjas generado. ....	58
Figura 29. Corrimiento de $\pi/2$ del patrón de franjas. ....	59
Figura 30. Máscara del filtro. ....	60
Figura 31. Filtrado de las franjas. a) Proyección de franjas sobre el plano, b) Transformada de Fourier, c) Aplicación del filtro.....	61
Figura 32. Sección de tubería a) Fotografía, b) Ampliación del detalle, c) Franjas proyectadas .....	63
Figura 33. Filtrado del objeto, a) Transformada de Fourier de la imagen del objeto, b) máscara del filtro y c) Frecuencias seleccionadas.....	64
Figura 34. Fases del objeto, a) discontinua, b) continua.....	64
Figura 35. Reconstrucción tridimensional, a) vista 1, b) vista 2 .....	65
Figura 36. Interface gráfica para la reconstrucción tridimensional.....	66
Figura 37. Creación de la máscara .....	68
Figura 38. Aplicación de la máscara sobre la reconstrucción .....	68
Figura 39. Superficie virtual .....	69
Figura 40. Profundidades de la corrosión. ....	69
Figura 41. Ubicación de los huecos seleccionados .....	70
Figura 42. Profundidad del hueco H1 .....	70
Figura 43. Profundidad del hueco H2. ....	70
Figura 44. Profundidad del hueco H3 .....	71
Figura 45. Selección de la zona corroída.....	72
Figura 46. Indicador de calidad ASME 8.....	73
Figura 47. Reconstrucción del IQI ASME8 .....	74
Figura 48. Altura del IQI ASME8, a) Vista superior, b) Perfil sobre el primer orificio. ....	74
Figura 49. Indicador de calidad ASTM.....	75

Figura 50. Reconstrucción del IQI ASTM.....75

Figura 51. Galga con espesor original de 38μm .....76

Figura 52. Reconstrucción de la galga.....77

Figura 53. Medición de la galga con el indicador de caratula .....78

Figura 54. Medidas de la galga.....78

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Precisión de algunos métodos ópticos .....	29
Tabla 2. Análisis comparativo de las técnicas que permiten la cuantificación de discontinuidades en la superficie externa de tuberías. ....	43
Tabla 3. Características de la cámara EO 1312C.....	49
Tabla 4. Medidas de profundidad de los huecos.....	71

## RESUMEN

**TÍTULO:** DISEÑO DE UNA METODOLOGÍA NO DESTRUCTIVA PARA LA CAPTURA DIGITAL Y EL DIMENSIONAMIENTO EN 3D DE DISCONTINUIDADES EXTERNAS EN TUBERÍAS DE TRANSPORTE DE HIDROCARBUROS\*.

**AUTOR:** Edward Yesith Mendoza González\*\*.

**PALABRAS CLAVE:** Ensayos no destructivos, reconstrucción 3D, proyección de franjas, análisis de integridad, corrosión externa en tuberías.

En este trabajo se presenta una metodología no destructiva para la reconstrucción tridimensional de zonas corroídas en la superficie externa de tuberías, mediante la implementación de un sistema óptico en laboratorio, empleando la técnica de proyección de franjas.

En primer lugar se presentan las principales técnicas no destructivas que permiten el dimensionamiento de discontinuidades generadas por corrosión en la superficie externa de tuberías, así como los principales parámetros a medir de las zonas corroídas, empleados en el análisis de integridad de la tubería, según el código ASME B31G. Posteriormente se describe la metodología empleada en el desarrollo de la investigación y se presentan los resultados obtenidos en cuanto a la selección de la técnica no destructiva, la implementación del sistema óptico en laboratorio, su calibración, caracterización, la adquisición y el procesamiento de la información para la reconstrucción tridimensional de las zonas corroídas. Además, se presentan pruebas en laboratorio de la técnica de ultrasonido por inmersión y radiografía industrial, empleadas en la detección y cuantificación de pérdidas de espesor de una probeta tubular con defectos artificiales. Finalmente se presenta la aplicación de la metodología desarrollada, en la reconstrucción de la superficie corroída de una tubería de muestra y mediante una interface grafica desarrollada en Matlab, se realiza el dimensionamiento de la máxima profundidad de la corrosión y la proyección de la zona corroída sobre el eje longitudinal de la tubería, parámetros necesarios para determinar la máxima presión de operación de las tuberías en servicio.

---

\* Tesis de Maestría, Trabajo de investigación

\*\* Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, Ingeniería Electrónica. Director: Luz Amparo Quintero Ortiz (MSc), Co-directores: Rodolfo Villamizar Mejía (PhD), Gerardo Santos Castañeda (MSc) y William Villamizar Suarez(Dr.)

## ABSTRACT

**TITLE:** DESIGN OF A NON-DESTRUCTIVE METHODOLOGY FOR THE DIGITAL CAPTURE AND THE MEASUREMENT IN 3D OF EXTERNAL DISCONTINUITIES IN PIPES OF HYDROCARBON TRANSPORT \*

**AUTHOR:** Edward Yesith Mendoza González \*\*

**KEYWORDS:** Non-destructive tests, 3D reconstruction, fringe projection, integrity analysis, external corrosion in pipes.

A non-destructive methodology is presented for the three-dimensional reconstruction of corrode zones on the external surface of pipes, through the implementation of an optical system in laboratory, using the technique of fringe projection.

First of all I present the principal non-destructive techniques which allow the measurement of discontinuities generated by corrosion on the external surface of pipes, as well as the principal parameters to measure in the corrode zones, used in the integrity analysis of the pipes according to the code ASME B31G. Subsequently I describe the methodology used in the research development and the results obtained of the non-destructive technique selection, the implementation of the optical system in laboratory, its calibration, characterization, acquisition and the word processing for the three-dimensional reconstruction of the corrode zones. Besides, we present tests in lab of the ultrasound technique by immersion and industrial x-ray used in the detection and quantifying of thickness loss of a test tube with artificial defects.

Finally I show the application of the methodology developed in the reconstruction of the corrode surface of a simple pipe by means of a graphic interface developed in Matlab. The measurement of the maximum depth of the corrosion is done and the projection of the corrode zone over the longitudinal axis of the pipe which are necessary parameters to determine the highest pressure of operation of the pipes in use.

---

\* Magister degree work.

\*\* Faculty of Physic-Mechanical Engineerings. Electrical, Electronic Engineering and Telecommunications' School, Electronic Engineering. Director: Luz Amparo Quintero Ortiz (MSc), Co-directores: Rodolfo Villamizar Mejía (PhD), Gerardo Santos Castañeda (MSc) y William Villamizar Suarez(Dr.)

## INTRODUCCIÓN

En la industria del petróleo donde se emplean sistemas de oleoductos y gasoductos, los cuales en muchas oportunidades están enterrados, es necesario realizar revisiones periódicas para determinar el estado de los mismos, ya que el efecto de la humedad, y la composición del suelo (entre otras variables) puede hacer que se presente un deterioro progresivo en el material, como por ejemplo la corrosión superficial, la cual se debe verificar y cuantificar adecuadamente para realizar el análisis de integridad de las tuberías y tomar las decisiones necesarias, con el fin de evitar perjuicios a la comunidad, daños en el medio ambiente y pérdidas económicas a las empresas.

Por lo anterior se hace necesario el estudio de las técnicas no destructivas para seleccionar la más adecuada de tal forma que permita extraer información de zonas corroídas en la superficie externa de las tuberías usadas en el transporte de los hidrocarburos, con el fin de obtener una representación tridimensional de las mismas y a partir de ella, dimensionar las discontinuidades presentes para determinar la vida útil residual de las tuberías.

## 1. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROBLEMA

La presencia de discontinuidades y corrosión en la superficie externa de las tuberías usadas en el transporte de hidrocarburos, reducen la capacidad de funcionamiento de la tubería y pueden causar el rompimiento de la misma. Este tipo de eventualidades ocasiona grandes problemas operativos, causando paradas inesperadas en la producción, pérdidas económicas y daños al medio ambiente por los derrames que se puedan presentar. Por lo tanto es necesario realizar tareas preventivas de inspección y dimensionamiento de las discontinuidades presentes en la superficie externa de las tuberías, con el fin de evaluar el nivel de deterioro de las mismas y tomar las decisiones pertinentes para garantizar su funcionamiento adecuado.

En la industria petroquímica el dimensionamiento de las discontinuidades se realiza, en muchas oportunidades, de forma manual utilizando galgas para medición de profundidades o medidores ultrasónicos para determinar las pérdidas de espesor ocasionadas por la corrosión externa. Este proceso requiere de tiempo para la obtención de resultados, es tedioso, está sujeto a error humano y en el mejor de los casos se puede obtener un perfil de la zona corroída realizando varias mediciones sobre la misma.

Por lo anterior, es necesaria la implementación de una metodología no destructiva, para obtener de forma rápida y adecuada un registro tridimensional de las zonas corroídas, de manera que la representación en 3D, permita la extracción de parámetros, como la máxima profundidad del área corroída y la proyección de esta sobre el eje longitudinal, los cuales son necesarios en el análisis de integridad y la determinación de la máxima presión de operación de las tuberías, según las normas establecidas para el transporte y distribución de los hidrocarburos en particular el código ASME B31 G del 91.

## **1.1. OBJETIVOS DE LA TESIS**

Los objetivos planteados para el desarrollo de la presente tesis de investigación se relacionan a continuación:

### **1.1.1. Objetivo general**

Establecer un procedimiento basado en procesamiento de señales, para dimensionar en 3D discontinuidades generadas por corrosión en la superficie externa de tuberías usadas en el transporte de hidrocarburos, mediante ensayos no destructivos.

### **1.1.2. Objetivos específicos**

- Seleccionar la técnica no destructiva más adecuada para obtener información de las discontinuidades, del área corroída, en la superficie externa de tuberías utilizadas en el transporte de hidrocarburos.
- Seleccionar e implementar algoritmos de adquisición y tratamiento de imágenes para representar en forma tridimensional las discontinuidades presentes en la superficie externa de una tubería de muestra.
- Establecer una metodología no destructiva para la adquisición y representación en 3D de zonas corroídas, con el fin de cuantificar su longitud, proyección sobre el eje longitudinal, y la profundidad máxima de la corrosión.
- Validar experimentalmente la metodología propuesta a nivel de laboratorio.

## **1.2. ESTRUCTURA DE LA TESIS**

La tesis está organizada en cinco capítulos. El presente capítulo incluye la descripción general del problema y los objetivos de la tesis. El capítulo 2 presenta

el marco conceptual referente a la evaluación de la corrosión externa en tuberías y las principales técnicas no destructivas que permiten su evaluación como son: ultrasonido, corrientes eddy, radiografía industrial e inspección visual. El capítulo 3 presenta la metodología que se llevo a cabo en el desarrollo de la presente tesis de investigación, describiendo cada una de las etapas que la conforman, dentro de las cuales están, la selección de la técnica no destructiva, adquisición y procesamiento de la información así como el diseño de la metodología de reconstrucción tridimensional. El capítulo 4 se presenta los resultados obtenidos de cada una de las etapas de la metodología propuesta, explicando lo relacionado con: la implementación del sistema de reconstrucción en laboratorio, su calibración, generación del patrón de franja, captura de las imágenes, filtrado, cálculo de la fase continua del objeto y la conversión de fase en alturas para obtener la topografía de la superficie evaluada, así como la validación de la metodología de reconstrucción y finalmente en el capítulo 5 se presenta las conclusiones de la investigación.

## 2. MARCO CONCEPTUAL

En el presente capítulo se abordarán los fundamentos teóricos básicos, relacionados con la evaluación de la corrosión externa en tuberías y algunas técnicas no destructivas que permiten la cuantificación de estas discontinuidades tales como: el ultrasonido, las corrientes Eddy, la radiografía industrial y la inspección visual.

### 2.1 EVALUACIÓN DE LA CORROSIÓN EXTERNA EN TUBERÍAS

La corrosión en tuberías de transporte de hidrocarburos, generalmente ocurre en la parte externa de las mismas, debido a que la mayoría de estas tuberías se encuentran enterradas.

La localización inicial de las zonas corroídas se puede realizar aplicando el estándar NACE RP O502, con base en el instructivo para la valoración directa de la corrosión externa (ECDA, *External Corrosion Direct Assessment*) y alguna de las técnicas comúnmente utilizadas ya sea inspección en línea usando marranos inteligentes o técnicas indirectas como la DCVG (*Direct Current Voltage Gradient*) [1] o la CIPS (*Close Interval Potential Survey*) [2], las cuales identifican los sitios en los cuales pueden estar ocurriendo procesos corrosivos y clasifican la severidad de dichos procesos.

Dependiendo de la severidad de la corrosión se procede a desenterrar la tubería para realizar una valoración directa de la zona corroída así como la extracción y el dimensionamiento de parámetros empleados en el análisis de la integridad de las mismas.

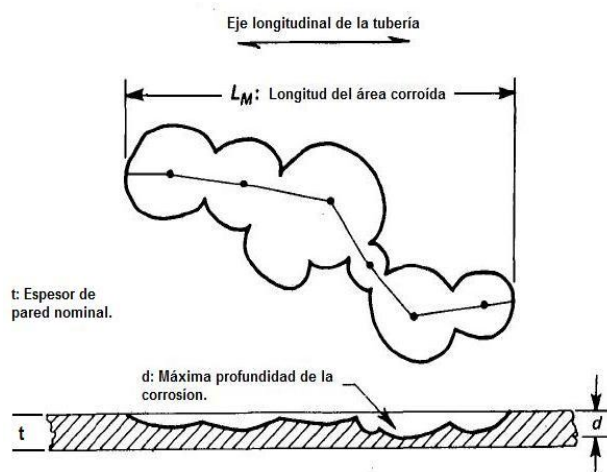
### 2.1.1 Principales parámetros usados en el análisis de la corrosión

Una de las principales variables a considerar en las tuberías de transporte de hidrocarburos, es la presión interna máxima a la cual, la tubería podría ser sometida durante la operación (MAOP, *Maximum Allowable Operating Pressure*), con el fin de lograr un funcionamiento seguro de las tuberías y evitar daños a particulares y al medio ambiente [3].

En la práctica recomendada DNV-RP-F101 [4] y en los códigos ASME B31 G [3] y ASME B31.8 [5], se relacionan los parámetros necesarios que se deben extraer de las zonas corroídas, para determinar la resistencia remanente de la tubería corroída y su máxima presión de operación permisible.

Los parámetros a cuantificar de la zona corroída, para calcular la máxima presión de operación de la tubería, son: La máxima profundidad de la corrosión ( $d$ ) y la proyección del área corroída sobre el eje longitudinal de la tubería ( $L_M$ ). Ver Figura 1.

**Figura 1. Parámetros usados para el análisis de la corrosión.**



Fuente [3]

A partir de la medición de los parámetros indicados y mediante el uso de expresiones matemáticas adecuadas se determinan las condiciones de operación más seguras, acordes con los daños encontrados y se establecen las reparaciones que se deben adelantar.

## **2.2 ALGUNAS TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS EMPLEADAS EN LA EVALUACIÓN DE CORROSIÓN EXTERNA EN TUBERÍAS**

Debido a que las técnicas anteriormente mencionadas tienen como principal función la detección y ubicación de las zonas corroídas, es necesario el uso de otras técnicas no destructivas que permitan la cuantificación de las discontinuidades en la superficie externa de tuberías, como la aplicación de ultrasonido, corrientes de eddy, radiografía industrial e inspección visual. A continuación se presentan las características principales de estas técnicas.

### **2.2.1 Ultrasonido**

El principio básico de este método consiste en excitar un transductor piezoeléctrico el cual convierte la energía eléctrica en energía mecánica. Al energizar el transductor se producen vibraciones a muy altas frecuencias (mayores a 20 KHz) llamadas frecuencias ultrasónicas [6], [7], [8].

La realización de este método consiste en colocar el transductor (palpador) sobre la superficie del material y desplazarlo sobre el material a evaluar. Cuando la técnica es por contacto, se utiliza un acoplante acústico (glicerina, aceite) para evitar la presencia de aire entre el palpador y la superficie del material y también facilitar el movimiento del transductor sobre la superficie de ensayo. De esta manera las ondas producidas por el transductor entran al material y viajan a través de él hasta encontrar un cambio de medio.

El cambio de medio se puede presentar por la presencia de discontinuidades en el material o simplemente al encontrar la superficie externa del material inspeccionado en contacto con el aire u otro medio. Cuando las ondas ultrasónicas chocan con las discontinuidades presentes en el material, se refleja y son detectadas por el palpador. La ubicación de las discontinuidades se calcula en relación a la velocidad del sonido en el material y el tiempo transcurrido desde la emisión de la onda hasta su recepción

La detección y evaluación de la corrosión en la superficie externa de tuberías se puede realizar aplicando las técnicas de ondas guiadas [9] y ultrasonido por inmersión, además para el análisis de defectos en tres dimensiones se aplica los arreglos de fase y ultrasonido multiplexado en inspección automática de grandes superficies [10].

Dentro de las principales ventajas para la técnica ultrasonido se destacan: la posibilidad de inspeccionar una amplia gama de materiales metálicos y no metálicos con diferentes espesores, se puede obtener información detallada de los defectos tanto superficiales e internos, es un método portátil y permite la aplicación en campo, se obtienen resultados en tiempo real y pueden ser almacenados en medios electrónicos. Se destaca su alta sensibilidad para detectar defectos relativamente pequeños.

Algunas de las desventajas asociadas a esta técnica son: se debe tener acceso al menos a una superficie del objeto a inspeccionar, su aplicación está limitada por la geometría de la pieza y su estructura interna, las superficies rugosas presentan problemas en la inspección, la evaluación de grandes superficies necesita del montaje de sistemas especiales y además requiere de un medio acoplante entre el palpador y la superficie de la pieza. Para la aplicación de la técnica es necesario una alta capacitación y entrenamiento del operario en el manejo adecuado de los

equipos y la interpretación de los resultados, además necesita de patrones de calibración y de referencia [6], [11], [12].

### **2.2.2 Corrientes eddy**

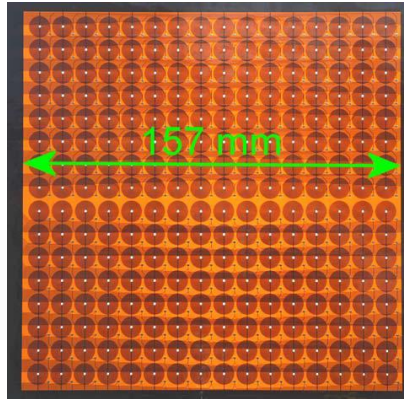
El principio de esta técnica se basa en la excitación de una bobina (sensor) con una corriente alterna. El paso de esta corriente a través de la bobina produce un campo magnético alternante con la misma frecuencia de la corriente de excitación. Al colocar el sensor sobre un material eléctricamente conductor se induce una corriente, la cual fluye por el material y produce un campo magnético secundario opuesto al generado en la bobina. El resultado de la interacción de los dos campos magnéticos es el que permite obtener información de las características del material inspeccionado [13], [14].

Las principales ventajas que ofrece esta técnica son: detecta discontinuidades superficiales y sub-superficiales, puede ser aplicada en superficies mojadas, presenta alta sensibilidad relativa y los resultados son inmediatos [15],

Entre sus principales limitaciones se tiene: es sensible a la geometría del objeto, baja penetración en el material, sus indicaciones son difíciles de interpretar, requiere direccionalidad de los defectos y el campo magnético y los cambios de conductividad del material afectan las condiciones de lectura [16].

Una aplicación importante de las corrientes Eddy, para la medición de defectos causados por la corrosión externa en tuberías, se desarrollo en San Antonio (Texas) [17], la cual utiliza como elemento sensor un arreglo de micro bobinas como se observa en la Figura 2.

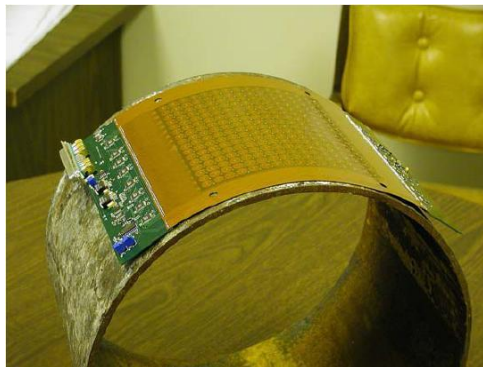
**Figura 2. Arreglo de 256 micro-bobinas.**



Fuente [17]

Este arreglo cubre un área de  $15 \times 15 \text{ cm}^2$ , lo cual permite obtener un mapa de la corrosión en la tubería de estas dimensiones o mayores por integración de varias áreas consecutivas. La información adquirida por el arreglo de las micro-bobinas se lleva a un computador mediante una tarjeta (DAQ) de National Instrument, con interfaz USB, la cual se analiza aplicando los códigos ASME B31.G y el ASME B31.G modificado, para la determinación de la resistencia remanente, empleando una interface grafica desarrollada en LabView. En la Figura 3 se observa la ubicación del arreglo de micro-bobinas sobre la tubería a inspeccionar.

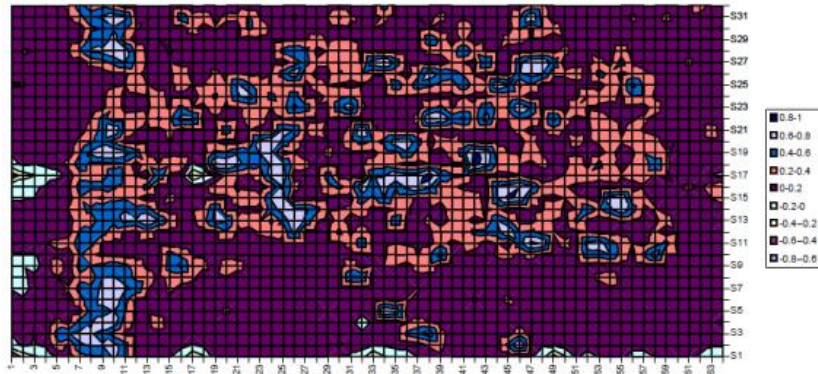
**Figura 3. Ubicación del arreglo de micro-bobinas sobre la tubería.**



Fuente [17]

Los resultados obtenidos fueron satisfactorios, presentándose como desventajas la potencia necesaria para alimentar el dispositivo y su alto costo para ser desarrollado en serie. El mapa de corrosión obtenido se muestra en la Figura 4.

**Figura 4. Mapa de profundidades de corrosión obtenido con el arreglo de micro-bobinas. Las unidades se presentan en cm.**



Fuente [17]

En el mapa de corrosión presentado, se aprecia una resolución de 2 milímetros en la variación de la profundidad de la corrosión. Sin embargo los autores no reportan información de la misma.

### 2.2.3 Radiografía industrial

Esta es una técnica de gran aplicación en la evaluación no destructiva de materiales, la cual utiliza radiaciones penetrantes, rayos x ó rayos gamma, para atravesar los cuerpos permitiendo evaluar su interior. La radiación que pasa a través del cuerpo parcialmente es absorbida (dependiendo del espesor, naturaleza atómica y densidad del material ensayado) y la radiación emergente se puede registrar en imágenes visuales permanentes, como radiografías o en indicaciones de otro tipo [18].

En general la radiografía puede detectar solamente aquellas características que tienen espesor apreciable en una dirección paralela al haz de radiación, esto significa que el alcance de la técnica para la detección de discontinuidades planares, como las grietas, o despegues depende de una orientación adecuada de la pieza durante la inspección.

Discontinuidades de tipo volumétrico como poros y huecos, se pueden detectar más fácilmente, pues tienen espesores posibles de medir en todas las direcciones; sin embargo, su tamaño no deber ser tan pequeño en comparación con el espesor de la pieza. Por lo tanto se requiere que las discontinuidades a evaluar tengan una diferencia en la absorción de la radiación del orden del 1% ó mayor, comparada con el material del alrededor para ser detectadas [18].

Aunque la técnica de radiografía convencional se emplea con éxito para la evaluación de ductos y tanques (inspección de soldaduras), también se ha utilizado en aplicaciones no convencionales como es la determinación del espesor de pared en tuberías con y sin recubrimiento [19], en tanques y accesorios tanto en la industria química como petroquímica, además de su empleo en el monitoreo de la corrosión en tuberías. Para estas aplicaciones, se han utilizado algunos métodos de inspección básicos entre los cuales se encuentran: El método de radiografía tangencial TRT y el de doble pared (TDW) [20], [21].

Dentro de las ventajas de esta técnica se encuentran el obtener un registro permanente del ensayo, se puede aplicar a una amplia variedad de materiales sólidos y piezas de geometrías complejas. La técnica permite la detección principalmente de discontinuidades volumétricas tanto externas como internas, mediante el uso de diferentes tipos de fuentes de radiación. Se puede obtener con precisión el tipo, tamaño y ubicación de la discontinuidad mediante el uso de técnicas especiales [20], [22].

Dentro de las desventajas asociadas a la técnica se encuentran: el necesitar acceso a dos caras de la pieza o material a inspeccionar, es indispensable tomar medidas estrictas de seguridad para su aplicación, la técnica tradicional necesita de un proceso extenso e instalaciones adecuadas para la obtención de los resultados, es un proceso relativamente costoso y no aplicable en casos de recipientes que contengan material radioactivo o en condiciones ambientales de alta temperatura [8], [23], [24].

Dentro de los estudios realizados empleando técnicas radiográficas se debe mencionar el desarrollado por la IAEA (International Atomic Energy Agency) dirigido a la evaluación de corrosión externa e interna y la presencia de depósitos de corrosión tanto en tuberías de diámetros de diferentes diámetros [22], [25].

El desarrollo del trabajo contó con la participación de laboratorios de diferentes países, y se utilizaron muestras de tuberías corridas y patrones con defectos artificiales para la simulación de pérdidas de espesor y otros defectos generados por la corrosión. En la Figura 5 se muestra la fotografía de alguno de estos patrones. Las técnicas utilizadas fueron la radiografía tangencial (TRT) y la técnica de doble pared-doble imagen (DWT).

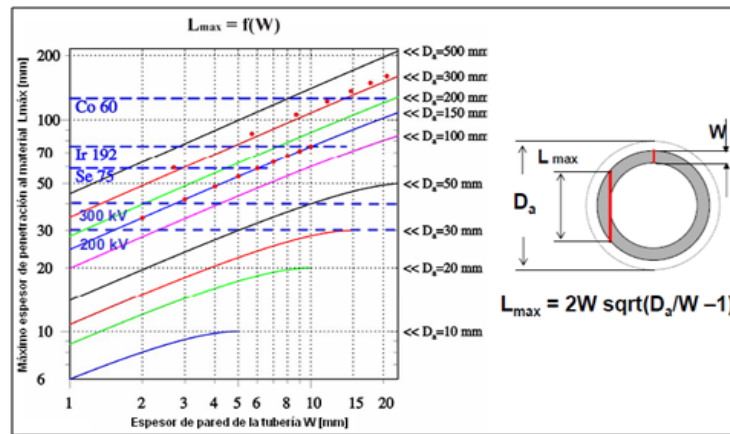
**Figura 5. Patrones tubulares con discontinuidades artificiales.**



Fuente: [24]

Dentro de los resultados reportados se encuentran que la técnica DWT es apropiada para la medida de cambios de espesores y profundidad local a partir de diferencias de densidades, aunque solo es aplicable en tuberías con diámetros menores a 90mm. Por otra parte la TRT es apropiada para la medida absoluta de espesores y su aplicación depende del diámetro de la tubería, su espesor, la distancia máxima de penetración en el espesor del material ( $L_{max}$ ) y la fuente de energía a utilizar, como se observa en la Figura 6.

**Figura 6. Límites de aplicación de la técnica TRT.**



Fuente:[20]

## 2.2.4 Inspección visual

La técnica de inspección visual es el método más económico y rápido para ubicar y seleccionar las discontinuidades superficiales de mayor influencia y se aplica siempre como primer elemento de juicio en la valoración de la integridad para posteriormente realizar otros ensayos definitivos que permitan cuantificar y determinar la funcionalidad de la tubería [26].

La inspección visual consiste en observar directamente la superficie del material a evaluar, con o sin la ayuda de instrumentación auxiliar como por ejemplo espejos, lupas, boroscopio, fibroscopios etc. Para aplicar este método, el inspector, debe

tener una capacitación previa y experiencia en la aplicación del mismo, para dar cumplimiento con lo establecido en códigos, normas y especificaciones tales como el ASME, sección V artículo 9.

Una de las limitaciones que presenta la técnica de inspección visual en la evaluación de materiales metálicos, es la detección de solamente las discontinuidades superficiales, con el agravante que presenta la visión humana para la identificación de las discontinuidades muy pequeñas. Los resultados mediante la aplicación de esta técnica presentan alto grado de subjetividad y es necesario el uso de dispositivos como cámaras, video cámaras etc, para el registro y almacenamiento de las zonas evaluadas con el fin de realizar análisis posteriores.

Adicionalmente, para disminuir la subjetividad en los resultados de la técnica, se han desarrollado y aplicado sistemas ópticos especializados para la captura de la información y mediante el tratamiento digital de imágenes obtener la reconstrucción tridimensional de la topografía del objeto.

**2.2.4.1 Sistemas de reconstrucción tridimensional:** Los sistemas ópticos permiten la reconstrucción tridimensional de superficies y son una alternativa muy importante en la evaluación de integridad de las tuberías, análisis de superficies erosionadas, detección de ampollas en recubrimientos y análisis de la corrosión generalizada presente en la superficie externa de tuberías [27], [28].

La implementación de un sistema óptico para la reconstrucción tridimensional depende fundamentalmente del tipo de iluminación a utilizar, campo de observación, tamaño de la superficie que se desea reconstruir y la precisión que se desea obtener. Los elementos principales a tener en cuenta en su implementación son: los sistemas de iluminación y adquisición, la unidad de control y tratamiento digital de las imágenes.

Los tipos de iluminación empleados en los sistemas de reconstrucción tridimensional se pueden clasificar generalmente como métodos activos y pasivos. Dentro de los métodos activos más comunes se encuentra el láser, los niveles de gris, la proyección de franjas, Moire, etc. Y en los métodos pasivos se encuentra la visión estéreo y el sombreado “*Shape from Shading*”. En los métodos activos se usa un patrón de radiación, el cual simplifica la obtención de la topografía de la superficie analizada. En los métodos pasivos no se necesita controlar la fuente de iluminación pero requiere de un alto esfuerzo computacional para extraer la información topográfica [29].

La precisión de los sistemas ópticos de reconstrucción tridimensional depende principalmente del método utilizado para la codificación de la información, el cual se selecciona según las condiciones metrológicas exigidas en la reconstrucción y la dimensión transversal del objeto a reconstruir. En la Tabla 1 se presenta la precisión que se puede obtener con algunos métodos de reconstrucción según el rango de medida y la dimensión transversal del objeto.

**Tabla 1. Precisión de algunos métodos ópticos.**

MÉTODO	RANGO DE MEDIDA	DIMENSION TRANSVERSAL DE OBJETO	PRECISIÓN $\pm \Delta Z$
Proyección de franjas	1mm : 300mm	1000mm x 1000mm	0.5 mm
	0.1mm : 50mm	100mm x 100mm	0.05mm
	0.05mm : 1mm	50mm x 50mm	0.01mm
Microscopia Confocal	0.001mm : 0.056mm	1mm x 1mm	50nm
Interferometría con luz blanca	2nm : 400 $\mu$ m	5mm x 5mm	2nm
Láser	0.02mm : 0.15 mm	4mm x 3mm	0.01mm

Fuente: [28]

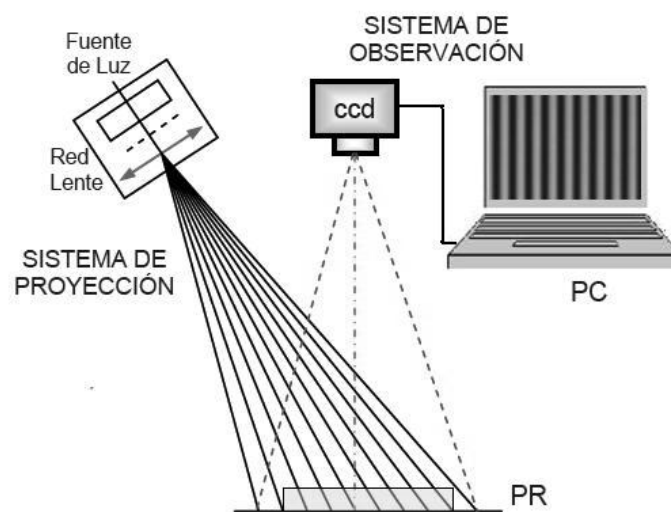
La técnica de proyección de franjas es una de las más utilizadas, debido a su fácil implementación, su rapidez de reconstrucción en comparación con las técnicas de luz estructurada como por ejemplo el láser, en el cual es necesario la implementación de un sistema de desplazamiento para el escaneo de la superficie a reconstruir y además su precisión es adecuada para la medición de los parámetros necesarios en la evaluación de integridad de tuberías.

A continuación se presenta la descripción del procedimiento de reconstrucción tridimensional por proyección de franjas.

➤ **Reconstrucción tridimensional mediante proyección de franjas**

La técnica de proyección de franjas consiste en proyectar un patrón de franjas periódicas sobre la superficie del objeto y a partir de la imagen del objeto con las franjas proyectadas, se interpretan las deformaciones como variaciones de la topografía del objeto, es decir, la deformación de las franjas codifica las variaciones de altura que posee el objeto [28], [30]. La Figura 7 muestra la descripción del sistema óptico utilizado en el método de proyección de franjas.

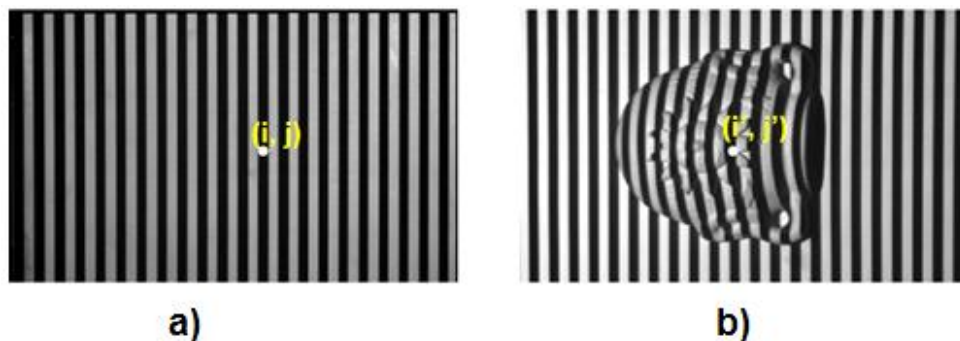
**Figura 7. Sistema Óptico de proyección de Franjas.**



Fuente: [28]

De la figura 7 se puede observar que el sistema óptico de proyección de franjas consta de un sistema de proyección, el cual es el encargado de proyectar el patrón de franjas sobre la superficie del objeto a reconstruir y un sistema de observación que permite registrar la imagen del objeto con las franjas proyectadas. El PC es el encargado de generar el patrón de franjas y almacenar las imágenes del objeto para posteriormente ser procesadas. Si las franjas se proyectan sobre una superficie plana, la imagen que se obtiene es de franjas paralelas entre sí y con paso constante, al proyectar las franjas sobre un objeto no plano, las franjas se deformaran debido a la topografía del mismo y del ángulo entre el eje óptico y el eje de proyección. Esto se puede observar en la Figura 8.

**Figura 8. Franjas proyectadas sobre el plano de referencia, a) sin objeto b) con objeto.**



Fuente: [28]

**Codificación de la información:** La distribución en intensidad luminosa del patrón de franjas capturada por la cámara, se puede describir matemáticamente por medio de la siguiente expresión [30], [31]:

$$I(x, y) = A(x, y) + B(x, y) * \cos(\varphi(x, y)) \quad (1)$$

Donde  $A(x,y)$  representa el fondo continuo de la imagen,  $B(x,y)$  el contraste de las franjas observadas y  $\varphi(x,y)$  es la fase del campo óptico que se desea

reconstruir, en esta fase se tiene en cuenta implícitamente la variación del paso de las franjas y la orientación de las mismas [28], [30]. Al colocarse un objeto en el plano de referencia, la ecuación (1) se altera así:

$$I(x, y) = A(x, y) + B(x, y) * \cos(\varphi(x, y) + \Delta\varphi(x, y)) \quad (2)$$

En este caso,  $\Delta\varphi(x, y)$  es la fase introducida principalmente por la topografía del objeto, las aberraciones geométricas, la no-telecentricidad de la cámara y el ángulo entre los ejes de proyección y observación [28]. La ecuación (2) se puede escribir como:

$$I(x, y) = A(x, y) + B(x, y) * \cos(\beta) \quad (3)$$

$$\beta(x, y) = \frac{2\pi}{P_p} x + \Delta\varphi(x, y) \quad (4)$$

Y en este caso  $\beta$  corresponde a la fase del sistema de franjas,  $P_p$  es el paso o separación promedio de la franjas medida sobre el plano de referencia.

De lo anterior se puede observar que la codificación de la topografía del objeto está en función de la fase ( $\beta$ ), y el objetivo del sistema de de reconstrucción tridimensional es recuperar dicha función.

**Cálculo de la fase del sistema de franjas:** El cálculo de la fase del sistema de franjas es un paso fundamental para la reconstrucción tridimensional del objeto. Este proceso se puede realizar por diferentes métodos; los más usados son la transformada de Fourier [32] y el corrimiento de fase (Phase Shifting) [33]. Este último es el utilizado en el desarrollo de esta investigación por su ventaja de poder obtener la fase para cada punto independiente de sus vecinos. Es decir, regiones sin información de franjas no afectan a las regiones útiles, a diferencia del primer método [28], [29].

El método de corrimiento de fase, calcula la fase del sistema de franjas a partir de N imágenes de franjas, a las cuales se les ha introducido un corrimiento constante en un periodo de  $2\pi$  [28], [30].

De la ecuación (3) se observa que existen tres incógnitas  $A(x,y)$ ,  $B(x,y)$  y  $\beta$ . Lo cual implica que se necesitan al menos tres datos de intensidad linealmente independientes para calcular la fase en cada punto de la imagen. Estos datos se obtienen experimentalmente desplazando el patrón de franjas con respecto al objeto, introduciendo una fase adicional  $\delta_i$  en el rango de 0 a  $2\pi$ , definida por:

$$\delta_i = \frac{2\pi}{N} (i - 1) \quad i = 1,2,3\dots N \quad (5)$$

Por lo anterior la ecuación (3) queda de la siguiente forma:

$$I(x, y) = A(x, y) + B(x, y) * \cos(\beta + \delta_i) \quad (6)$$

Aplicando las propiedades ortogonales de las funciones sinusoidales y algunas operaciones algebraicas [28], [31], [33], se puede demostrar que:

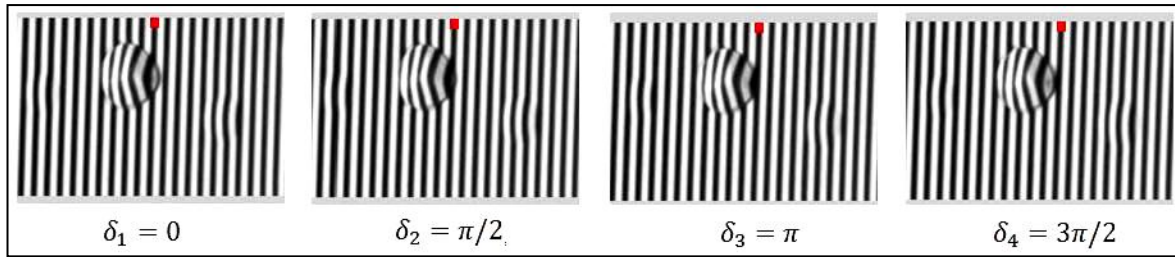
$$\tan \beta = \frac{\sum_{i=1}^N I_i * \sin \delta_i}{\sum_{i=1}^N I_i * \cos \delta_i} \quad (7)$$

La forma más rápida para obtener  $\beta$  es hacer  $N=4$ , es decir cuatro registros con  $\delta_1=0$ ,  $\delta_2=\pi/2$ ,  $\delta_3=\pi$  y  $\delta_4=3\pi/2$  dando como resultado:

$$\beta = \tan^{-1} \frac{I_2 - I_4}{I_1 - I_3} \quad (8)$$

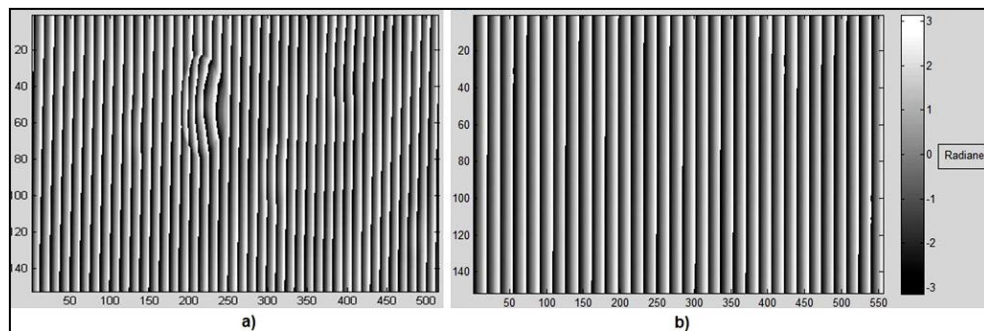
Un ejemplo de los cuatro registros con su respectivo corrimiento se muestra en la Figura 9.

**Figura 9. Imágenes de corrimiento de fase**



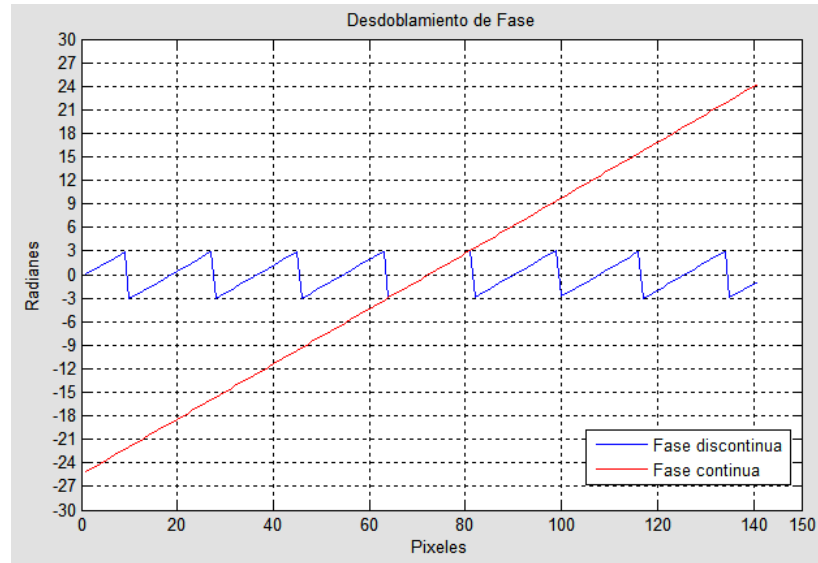
Con las cuatro imágenes mostradas en la Figura 9 y aplicando la ecuación (7) se obtiene la fase ( $\beta$ ), esta fase se puede observar en la Figura 10.

**Figura 10. Fase del sistema de franjas, a) Fase con objeto b) Fase del plano de referencia sin objeto.**



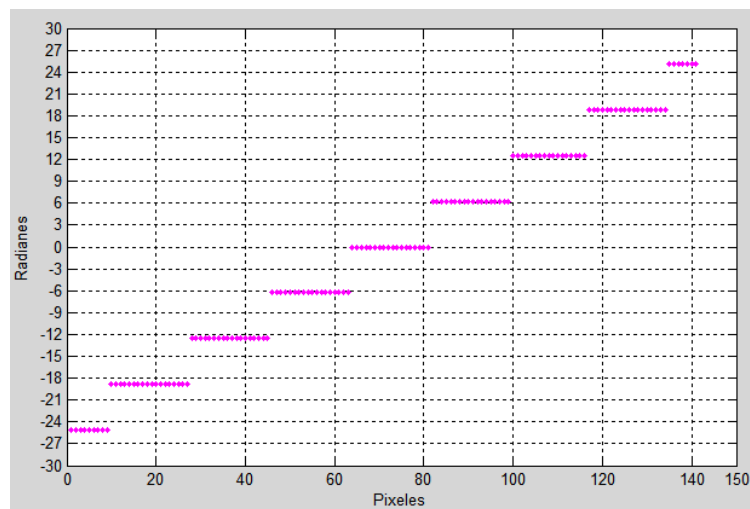
De la figura 4b se observa que hay discontinuidades en la fase y esto se debe a la función inversa arcotangente cuyo rango toma valores de  $-\pi$  a  $\pi$  radianes. Por tanto, se debe corregir estos saltos de  $\pm 2\pi$ , para obtener una fase continua. Esto se logra aplicando el método de desdoblamiento de fase, conocido como “Unwrapping” [34]. Este método consiste en adicionar o restar valores apropiados de  $2\pi$  en cada discontinuidad de la fase para así obtener una fase continua. En la Figura 11 se presenta en detalle el desdoblamiento de fase para la fila 100 de la Figura 10b.

**Figura 11. Desdoblamiento de fase.**



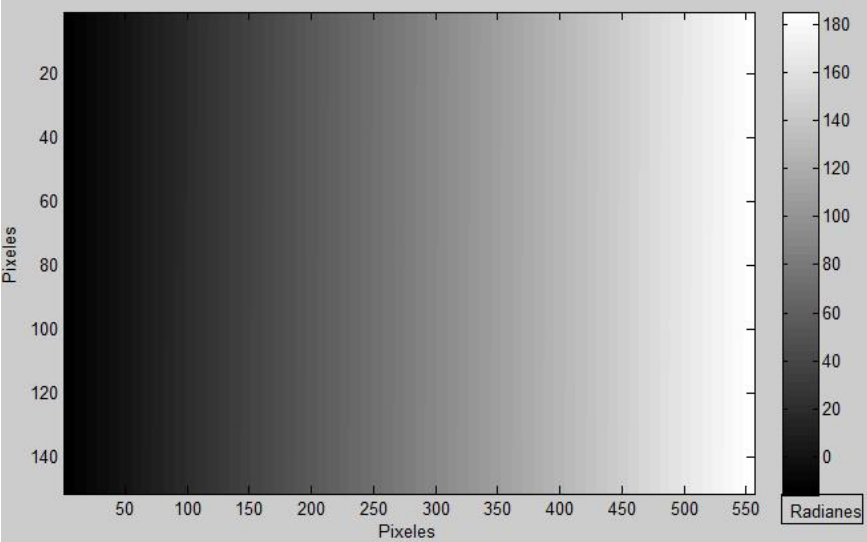
Al realizar la diferencia entre la fase continua y fase discontinua de la figura 8, se pueden encontrar los valores que se utilizaron para la corrección de fase, ver Figura 12. Estos valores son múltiplos de  $2\pi$  y cambian respecto al punto que se inicia el desdoblamiento, para este caso el punto de inicio se tomó la fila 100 y la columna 70 de la Figura 10b.

**Figura 12. Valores necesarios para la corrección de fase**



La fase continua, para la Figura 10b, aplicando el método de desdoblamiento se observa en la Figura 13.

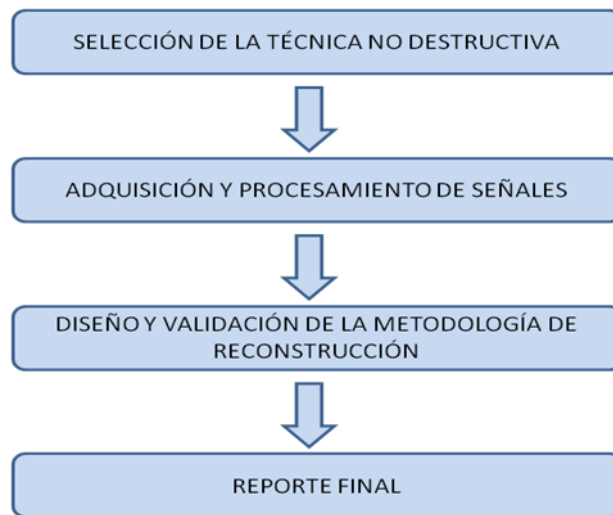
**Figura 13. Fase continúa del sistema de franjas**



### 3. METODOLOGÍA

La metodología propuesta en la presente investigación consta de cuatro fases: Selección de la técnica no destructiva, adquisición y procesamiento de señales, diseño y validación de la metodología de reconstrucción y finalmente la elaboración del documento donde se reportan los resultados obtenidos en cada una de las fases. En la Figura 14 se presenta el diagrama de la metodología.

**Figura 14. Metodología propuesta**



A continuación se describe cada una de las etapas de la metodología propuesta para el desarrollo de la presente investigación.

#### 3.1 SELECCIÓN DE LA TÉCNICA NO DESTRUCTIVA

Con base en la bibliografía revisada se realizó un análisis comparativo de las principales técnicas no destructivas existentes, que permiten cuantificar discontinuidades presentes en la superficie externa de tubería utilizada en el

transporte de hidrocarburos, con el fin de determinar la técnica más adecuada para esta aplicación.

Se tomaron como criterios de selección de la técnica, tipos de defectos detectables en la superficie externa, costos de implementación, registro tridimensional de la zona evaluada, rapidez en la obtención e interpretación de los resultados y la resolución en la cuantificación de discontinuidades. Los resultados obtenidos de este análisis se presentan en el capítulo 4.

### **3.2 ADQUISICIÓN Y PROCESAMIENTO DE SEÑALES**

Mediante la fase anterior se determinó que la técnica no destructiva más adecuada, para la reconstrucción tridimensional de la superficie externa de una tubería, era la implementación de un sistema óptico empleando el método de proyección de franjas. Los parámetros a medir con este sistema son: la profundidad máxima de la zona corroída y su proyección sobre el eje longitudinal de la tubería. Estos parámetros se establecieron según el código ASME B31G, el cual se utiliza en el análisis de la integridad de tuberías en servicio.

Como se mencionó en la parte teórica, para la reconstrucción tridimensional de una superficie empleando la técnica de proyección de franjas, es necesario obtener registros fotográficos de la proyección del patrón de franjas sobre la superficie a reconstruir.

La obtención de estos registros se realizó mediante la implementación del sistema óptico, de forma experimental en el laboratorio, para lo cual se utilizó un videobeam convencional para la proyección del patrón de franjas sobre la superficie a reconstruir y una cámara, con interface USB, para capturar las imágenes de cada uno de los corrimientos del patrón de franjas sobre el objeto. La

cámara se ubicó perpendicular a la superficie del objeto a una distancia mínima que permitiera obtener un campo de observación de  $12 \times 10 \text{ cm}^2$  y se determinó el mejor ángulo ( $\theta$ ) de ubicación del videobeam respecto al eje de observación, con el fin de minimizar las reflexiones luminosas del objeto en dirección a la cámara. Una vez implementado el sistema se procedió a realizar su calibración, con el fin de obtener la relación entre la fase y la altura para un objeto plano (altura constante). El objeto que se utilizó para calibrar el sistema fue un vidrio de  $14 \times 14 \text{ cm}^2$ , pintado de blanco mate para lograr un mejor contraste con el patrón de franjas proyectado, el cual se denominó plano de referencia. El procedimiento de calibración consistió en realizar corrimientos del plano de referencia, empleando un sistema de desplazamiento micrométrico, a intervalos constantes en dirección perpendicular al eje óptico de la cámara. Para cada corrimiento, se registraron las imágenes del patrón de franjas proyectado sobre el plano y mediante el desarrollo de algoritmos en Matlab se calculó la fase de cada uno de ellos. Finalmente se realizó una regresión polinomial cuadrática para determinar la relación fase-altura y así hallar los coeficientes de calibración del sistema.

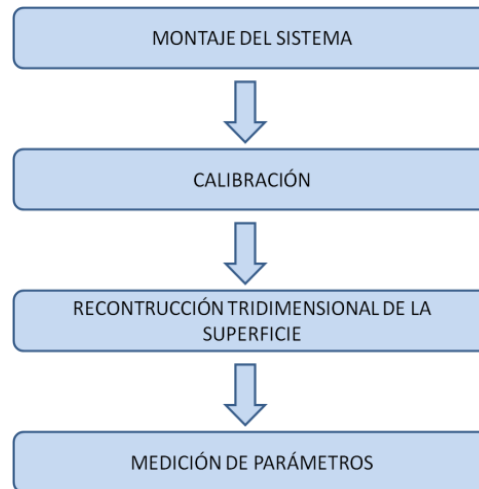
### **3.3 DISEÑO Y VALIDACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE RECONSTRUCCIÓN.**

En la etapa anterior se realizó la implementación del sistema para la adquisición de la información y el procedimiento de calibración del mismo. A partir de esto se estableció como metodología de reconstrucción la integración de estas etapas con la reconstrucción tridimensional de superficies y la medición de parámetros como se observa en la Figura 15.

Una vez realizada la calibración se reemplazó el plano de referencia por el objeto a reconstruir, para este caso la tubería y se procedió a tomar el registro fotográfico de cada uno de los corrimientos del patrón de franja proyectado sobre la superficie de la misma. Posteriormente se realizó el tratamiento digital a las imágenes,

aplicando los algoritmos desarrollados para obtener la fase del objeto, el desdoblamiento de la fase (fase continua) y finalmente la diferencia de fase del objeto y el plano de referencia para así determinar la altura del mismo.

**Figura 15. Metodología de reconstrucción**



A partir de la reconstrucción tridimensional de la superficie, se procedió a extraer los principales parámetros establecidos, como la máxima profundidad de la corrosión en la región analizada y la proyección de la zona corroída sobre el eje longitudinal.

La aplicación de la metodología propuesta sobre la superficie externa de una tubería corroída, mostró la capacidad del sistema implementado para la reconstrucción tridimensional y permitió la validación de misma. Adicionalmente se caracterizó el sistema mediante la determinación de su capacidad de resolución y área mínima detectable. Finalmente se compararon mediciones hechas con el sistema óptico con las directamente realizadas sobre la tubería de muestra, empleando otros sistemas de medida (comúnmente utilizados en campo) como son: la galga de picado y el ultrasonido.

### **3.4 ELABORACIÓN DEL DOCUMENTO FINAL.**

La elaboración del documento final se realizó a partir de los resultados obtenidos de cada una de las fases de la metodología anteriormente mencionadas.

## **4. RESULTADOS Y ANÁLISIS**

En este capítulo se presentan los resultado obtenidos en el desarrollo de la presente investigación, teniendo en cuenta las etapas señaladas dentro de la metodología descrita en el capítulo anterior.

### **4.1 SELECCIÓN DE LA TÉCNICA NO DESTRUCTIVA.**

A partir de la revisión bibliográfica se hizo el análisis comparativo de las principales técnicas que permiten la evaluación y la cuantificación de discontinuidades en la superficie externa de tuberías. En la Tabla 2 se presta el resultado obtenido.

Además de la información presentada en la Tabla 2, se debe tener en cuenta la facilidad de implementación en campo de la técnica seleccionada con proyección a trabajos futuros.

Por lo anterior, la técnica más adecuada para la aplicación de esta investigación es la implementación de un sistema óptico, empleando la técnica de proyección de franjas, por la rapidez de obtención del registro tridimensional, su apropiada resolución, bajos costos de implementación y su relativa facilidad de aplicación en campo.

**Tabla 2. Análisis comparativo de las técnicas que permiten la cuantificación de discontinuidades en la superficie externa de tuberías.**

<b>Técnica NDT</b>	<b>Defectos detectables</b>	<b>Costos de aplicación</b>	<b>Registro 3D de la superficie evaluada</b>	<b>Obtención de resultados e interpretación</b>	<b>Resolución</b>
<b>Corrientes de Eddy</b>	Corrosión uniforme, picado, grietas, cambios de conductividad eléctrica.	<b>Medio-Alto</b> Inversión inicial de equipos	Permite obtener mapas de corrosión con arreglos de micro bobinas [17]	Manejo de múltiples variables, rápida obtención de resultados y necesita personal capacitado y con experiencia en la técnica.	Longitud mínima del defecto de 1.6 mm
<b>Ultrasonido</b>	Pérdidas de espesor, grietas, picado	<b>Medio-Alto</b> Inversión inicial de equipos.	Permite obtener mapas de corrosión, empleando multiplexación de palpadores y arreglos de fase.	Rápida obtención de resultados y necesita personal capacitado	1mm en pérdidas de espesor en acero
<b>Radiografía industrial</b>	Picado, inclusiones, abolladuras, pérdidas de espesor, grietas, depósitos de productos de corrosión.	<b>Alto</b> Inversión inicial de equipos, consumibles y medidas de seguridad.	No es posible por radiografía convencional.	Requiere de tiempo para la obtención de resultados y un corto entrenamiento del operario.	1mm en pérdidas de espesor utilizando radiografía tangencial.
<b>Sistemas ópticos</b>	Corrosión uniforme, rayaduras, indentaciones, rugosidad de la superficie, erosión, ampollamientos	<b>Bajo</b> Necesita equipo y elementos de costo relativamente bajo.	Reconstrucción de superficies en tres dimensiones.	Rápida obtención de resultados y corto entrenamiento del operario.	Láser: 0.01 mm con campo de observación de 4mm x3mm.  Proyección de franjas: 0.05mm en campo de observación de 100x100mm <sup>2</sup>

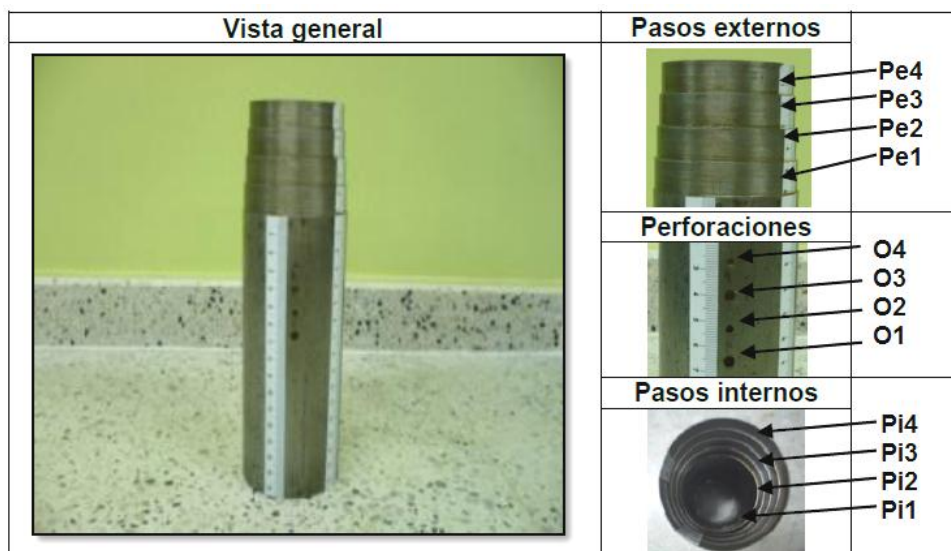
Paralelamente al estudio de la técnica seleccionada se desarrollaron aplicaciones en laboratorio de las técnicas de ultrasonido por inmersión y radiografía industrial, con el fin de explorar la capacidad de estas técnicas en la detección de pérdidas de espesor en la superficie externa de una probeta tubular, empleando los equipos disponibles en la universidad.

#### 4.1.1 Prueba en laboratorio de las técnicas de ultrasonido y radiografía.

Se realizaron pruebas en el laboratorio de Ensayos No Destructivos de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica de la UIS, empleando la técnica de ultrasonido por inmersión y radiografía (utilizando la técnica de doble pared-doble imagen), a una probeta tubular con defectos artificiales

La probeta tubular se diseño con disminuciones de espesor y orificios de diferente diámetro y profundidad [35], combinando algunos modelos encontrados en la revisión bibliográfica [22], [25], con el fin de simular discontinuidades externas e internas como se observa en la Figura 16.

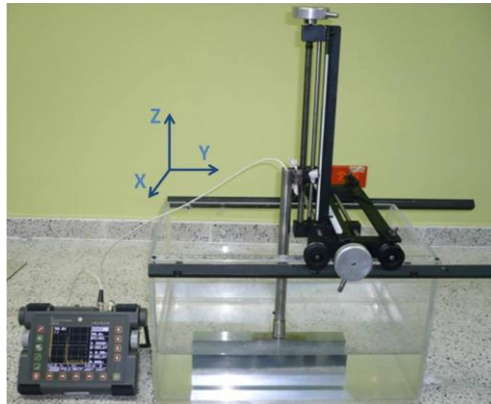
**Figura 16. Probeta tubular**



La probeta se fabricó de una sección de tubería de acero ASTM A53 de diámetro exterior de 3 in (76.2mm) y espesor nominal de 0.236 in (6 mm). Las reducciones de espesor en cada uno de los pasos externos e interno y la profundidad de los orificios fueron aproximadamente de 20%, 40%, 60% y 80% del espesor nominal respectivamente [35].

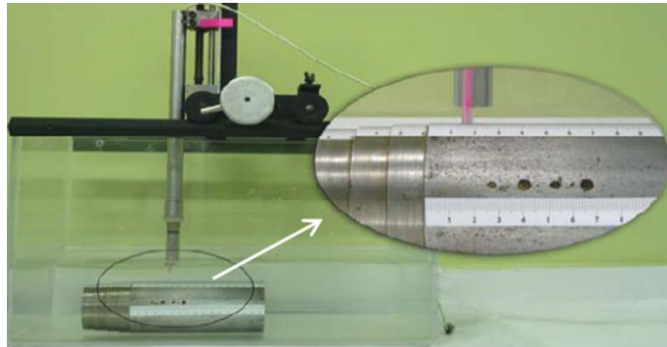
**4.1.1.1. Ultrasonido por inmersión:** La aplicación de la técnica de ultrasonido se realizó por el método de inmersión, para lo cual se utilizó el equipo ultrasónico “KrautKramer USM 35XS”, un palpador hermético con frecuencia de 10 Mhz y diámetro 0.187 in y se diseñó e implementó el sistema de inmersión como se muestra en la Figura 17, el cual permite el desplazamiento del palpador en los tres ejes coordenados [36].

**Figura 17. Sistema de inmersión.**



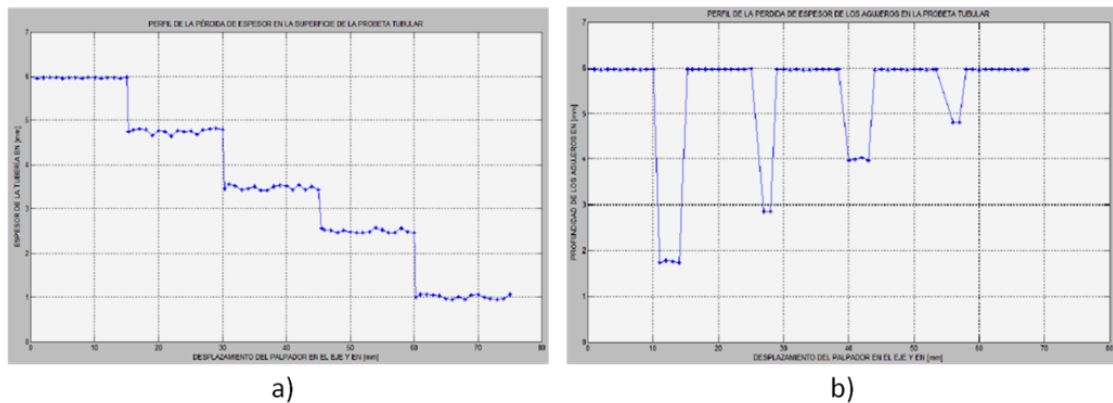
Para la evaluación de la probeta tubular se utilizó agua como medio acoplante, se determinó el valor de la columna de agua (distancia mínima entre el palpador y la superficie de la tubería) y se realizó un barrido del palpador en dirección del eje Y. En la Figura 18 se observa la ubicación de la probeta para su evaluación.

**Figura 18. Ubicación de la probeta en la cuba de inmersión**



El perfil de las discontinuidades externas y los orificios de la probeta se obtuvieron realizando desplazamientos discretos del palpador sobre el eje Y, a intervalos constantes de 1mm. Estos perfiles se pueden apreciar en la Figura 19.

**Figura 19. Perfiles de la probeta a) Discontinuidades externas b) Orificios**



De la realización de esta prueba se pudo comprobar que la técnica de ultrasonido por inmersión permite medir las variaciones de espesor en la superficie externa de probetas tubulares, presentando mayor dificultad en las discontinuidades de fondo plano y diámetros pequeños.

La técnica de ultrasonido por inmersión puede ser de fácil aplicación en laboratorio, pero su montaje en campo para la evaluación de tuberías en servicio puede resultar muy complejo y además se requiere de un sistema de

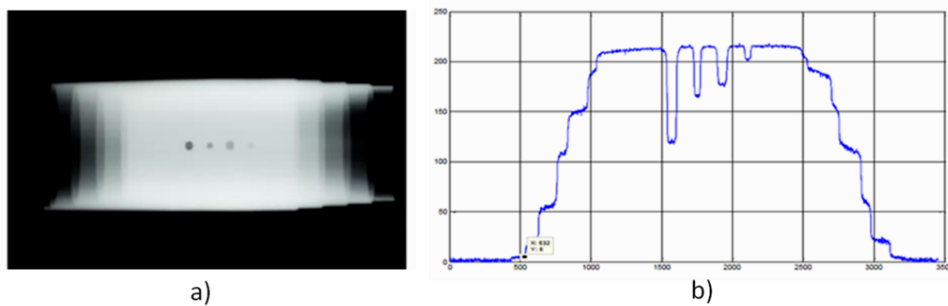
desplazamiento controlado del palpador para realizar el escaneo del área corroída y así obtener la topografía de la superficie evaluada.

**4.1.1.2. Medición de discontinuidades a partir de radiografías digitalizadas:** A la probeta tubular descrita, se le tomaron imágenes radiográficas mediante la técnica de doble pared doble imagen y se digitalizaron con el fin de determinar las pérdidas de espesor, mediante tratamiento digital de imágenes.

Las radiografías se tomaron utilizando el equipo de rayos x “Baltospot GFD 165” del laboratorio y película radiográfica “Agfa structurix D7”. De las radiografías tomadas a la probeta, con diferentes condiciones de exposición, se seleccionó la mejor, teniendo en cuenta la densidad de una escalerilla de acero calibrada (la cual se ubicó al lado de la probeta como patrón de referencia para los espesores) y siguiendo las recomendaciones establecidas en normas técnicas sobre la densidad radiográfica (ASTM E1742-08a).

Una vez seleccionada la radiografía se llevó a cabo su digitalización mediante el uso de una cámara digital “CANON EOS”, con tecnología CMOS y tamaño de imagen de 3456x2304 pixeles. A partir de la radiografía digitalizada se determinó la relación de espesores de la escalerilla calibrada con el nivel de gris de la imagen, para así poder determinar los espesores de la probeta. En la Figura 20 se muestra la radiografía digitalizada de la probeta y el perfil que pasa por el centro de los orificios [35].

**Figura 20. Radiografía de la probeta, a) Fotografía b) Perfil**



Aplicando tratamiento digital de imágenes a la radiografía digitalizada, se logró determinar la pérdida de espesor de cada uno de los pasos externos e internos así como el diámetro de los orificios y sus profundidades.

Se presentaron dificultades en la medición de espesores menores del 20% y mayores del 60% del espesor nominal, debido a las densidades radiográficas obtenidas en una sola radiografía, por lo cual sería necesario análisis parciales de la probeta con diferentes condiciones de exposición para la evaluación total de la misma, haciéndose dispendioso y costoso este procedimiento.

Por otra parte la técnica radiográfica empleada solamente aplica para tuberías de diámetros menores a 90mm y se presentan limitaciones en la energía necesaria para la toma de la radiografía cuando el espesor de la tubería incrementa, necesitando del uso de otro tipo de fuentes.

#### **4.2 ADQUISICIÓN Y PROCESAMIENTO DE SEÑALES.**

Como ya se ha mencionado, la adquisición de la información de la superficie de la tubería se realizó mediante la implementación de un sistema óptico utilizando la técnica de proyección de franjas.

#### 4.2.1 Montaje del sistema de reconstrucción 3D

El sistema óptico de reconstrucción tridimensional implementado, está conformado por un sistema de proyección, un sistema de observación y adquisición de información. Como sistema de proyección se utilizó un videobeam marca Optoma con tecnología DLP, tamaño de pantalla de 800X600 pixeles y distancias de focalización en el rango de 0.5 a 10m. Para el sistema de observación se utilizó una cámara CCD, de referencia EO 1312C, con interface USB y resolución de 1280x1024 pixeles. Otras características de la cámara se muestran en la Tabla 3. El lente utilizado en la cámara fue de 16 mm de longitud focal con ajuste manual del diafragma.

**Tabla 3. Características de la cámara EO 1312C**

Tipo de sensor	Sony ICX205
Área del sensor, HxV (mm)	5.95 x 4.76
Pixeles (H x V)	1280 x 1024
Tamaño de pixel, H x V ( $\mu\text{m}$ )	4.65 x 4.65
Profundidad de pixel	8-bit
Velocidad	15-fps
Montura del lente	Montura C

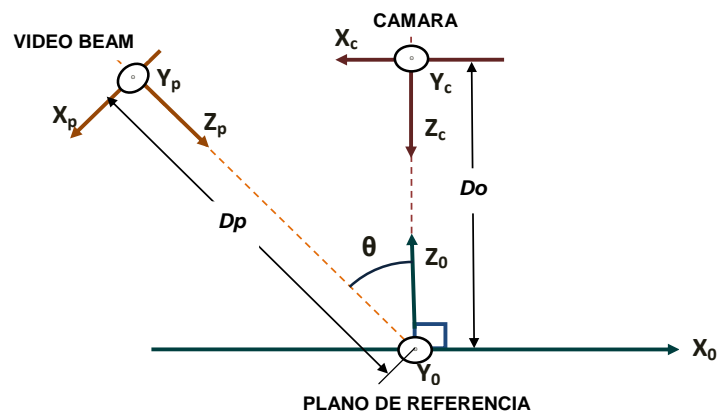
La adquisición de la información se realizó por medio de un computador portátil con sistema operativo Windows Vista de 32 bits. Por medio del computador y utilizando programas desarrollados en Matlab, se generó y desplazó de manera controlada el patrón de franjas. Las imágenes capturadas por la cámara fueron almacenadas en la memoria del computador para su posterior procesamiento. En la Figura 21 se observa el montaje experimental del sistema.

**Figura 21. Sistema óptico implementado**



Con el fin de obtener un campo de observación de aproximadamente  $12 \times 10 \text{cm}^2$ , se ubicaron sus componentes de la siguiente manera: la distancia entre la cámara y el plano de referencia ( $D_o$ ) es de 32cm, la distancia entre el plano de referencia y el videobeam ( $D_p$ ) es de 57cm y el ángulo ( $\theta$ ) entre el eje de proyección y el eje de optico es de aproximadamente  $31^\circ$  grados. Ver Figura 22.

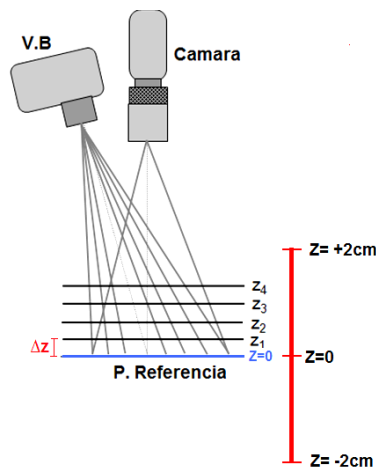
**Figura 22. Coordenadas del sistema implementado**



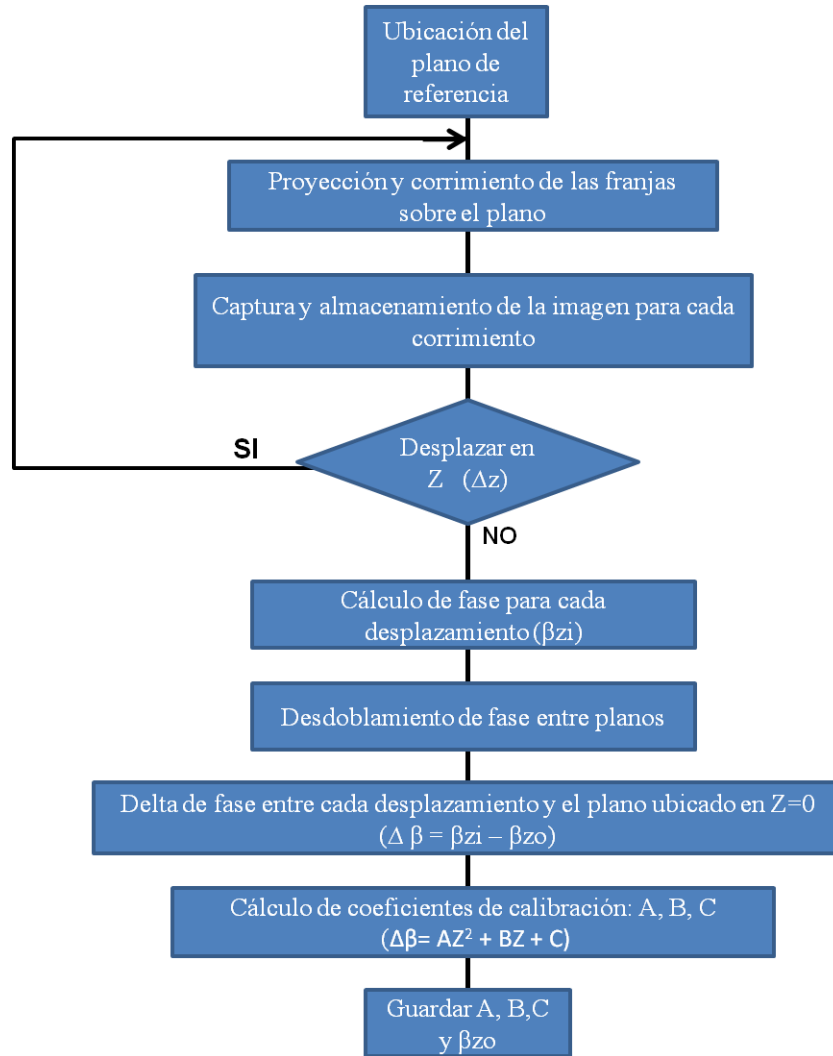
#### 4.2.2 Calibración del sistema

Como se mencionó en el capítulo 2, en la ecuación (3), la topografía del objeto se codifica por la variación de la fase del sistema de franjas. Por lo tanto es necesario encontrar una relación de fase–altura para poder reconstruir tridimensionalmente un objeto. Del sistema coordinado se tiene que la altura del objeto varia a lo largo del eje  $Z_0$  (dirección del eje óptico), por lo tanto el procedimiento de calibración consiste en realizar desplazamientos del plano de referencia a lo largo del eje  $Z$  a intervalos  $\Delta Z$  conocidos y calcular la fase para cada corrimiento. En la Figura 23 se muestra un esquema de dichos desplazamientos indicándose la posición  $Z=0$  en la cual se encuentra el máximo enfoque de la cámara. En la Figura 24 se puede observar el diagrama de flujo del proceso de calibración.

Figura 23. Esquemático de los desplazamientos en  $Z$ .



**Figura 24. Proceso de calibración**



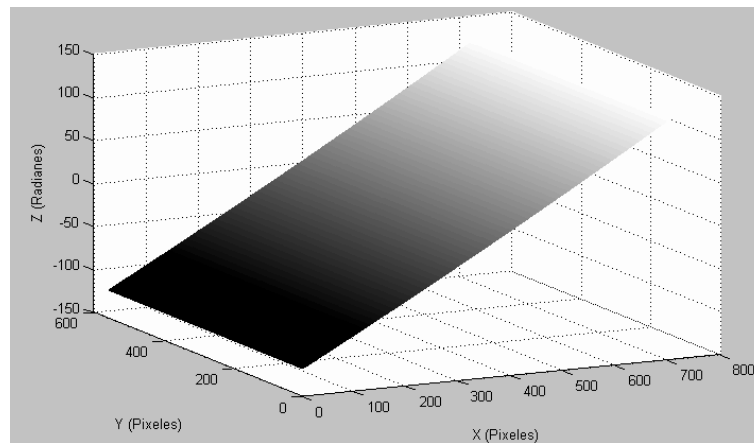
Para la calibración del sistema se colocó el plano de referencia sobre un sistema de desplazamiento micrométrico en dirección a la coordenada  $Z_0$ , es decir el plano queda paralelo al plano  $X_0Y_0$  y perpendicular al eje óptico de la cámara. Usando el sistema de desplazamiento, se realizaron corrimientos constantes al plano de referencia sobre el eje  $Z_0$  de quinientas micras ( $\Delta z = 500\mu\text{m}$ ) en un rango de cuatro centímetros (4 cm) como se observa en la Figura 23.

Para cada desplazamiento se capturan y almacenan las cuatro imágenes correspondientes a cada corrimiento del patrón de franjas proyectadas sobre el

plano y se calcula su correspondiente fase continua. Esto se realiza, aplicando la ecuación (8) y el respectivo desdoblamiento de la fase como es explicado en el capítulo 2. En la Figura 25 se observa la fase continua del plano de referencia ubicado en  $Z=0$ .

A medida que se van realizando los desplazamientos  $\Delta z$ , las franjas proyectadas se van desplazando en el plano hasta un punto donde dicho desplazamiento es mayor que la separación entre las mismas; esto ocasiona un salto en fase de  $2\pi$ , por lo tanto se hace necesario aplicar un desdoblamiento entre planos para así obtener un crecimiento en fase a medida que se realizan los desplazamientos en dirección positiva del eje  $Z$ .

**Figura 25. Fase continua del plano de referencia en  $Z=0$**



Como los desplazamientos del plano en dirección al eje  $Z_0$  son constantes ( $\Delta z$ ), se conoce la distancia (altura) de cada uno de ellos respecto al punto  $Z=0$ , es decir, de la Figura 23, el plano ubicado en la posición  $Z_1$  tiene una altura de quinientas micras ( $500\mu\text{m}$ ), en la posición  $Z_2$  tiene una altura de mil micras ( $1000\mu\text{m}$ ) y así sucesivamente hasta terminar los desplazamientos; de forma similar se puede calcular un delta de fase ( $\Delta\beta$ ) por medio de la diferencia entre la fase continua para cada desplazamiento del plano y la fase del plano ubicado en  $Z=0$  (plano de referencia). Estas diferencias de fase se pueden relacionar con la altura correspondiente de los planos de la siguiente forma [28]:

$$\Delta\beta(x, y) = \beta_{z_i}(x, y) - \beta_{z=0}(x, y) = A(x, y)Z^2 + B(x, y)Z + C(x, y) \quad (9)$$

Donde los coeficientes  $A(x,y)$ ,  $B(x,y)$  y  $C(x,y)$  relacionan la fase con la altura para cada pixel de las imágenes del plano y se calculan por medio de una regresión polinomial cuadrática por mínimos cuadrados. Estos coeficientes se denominan coeficientes de calibración o matrices de calibración y son utilizados posteriormente, junto a la fase continua del plano de referencia, para la reconstrucción tridimensional de los objetos.

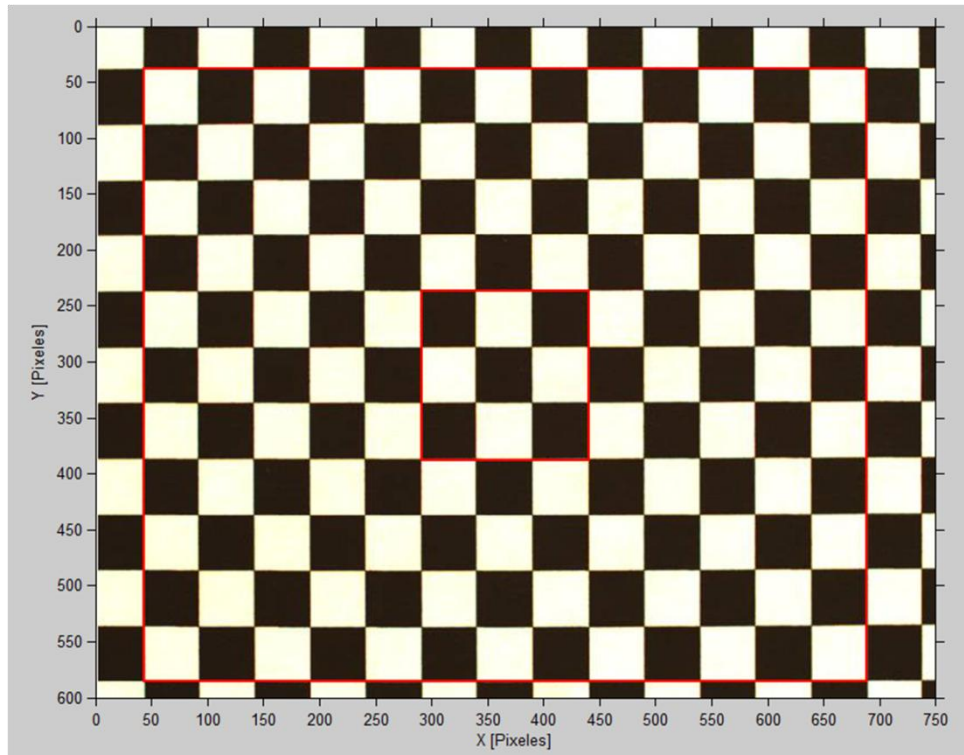
#### **4.2.3 Factor de conversión de pixeles a milímetro.**

Este proceso consiste en obtener el factor de conversión de un punto en el espacio imagen a un punto en el espacio objeto. Debido a que las unidades de los ejes  $X_c$  y  $Y_c$  de las imágenes capturadas por la cámara están en pixeles, se debe encontrar un factor de conversión de pixeles a milímetros sobre el plano de referencia, para representar el objeto reconstruido en su espacio coordenado.

Esta relación se puede obtener utilizando el factor de ampliación geométrico de la cámara, siempre y cuando se garantice que el eje óptico sea perpendicular al plano de referencia y que la cámara utilizada no presente distorsiones geométricas considerables. Si el sistema implementado no cumple con las condiciones anteriores, se debe aplicar otro procedimiento de calibración donde se tenga en cuenta la posición espacial de la cámara (rotación, traslación, distancia focal, etc) y la influencia de las distorsiones geométricas sobre la imagen [30], [37].

Para determinar el factor de conversión del sistema utilizado, se ubicó una grilla de ajedrez, con cuadrados de 10 mm de lado, en la posición del plano de referencia ( $Z_0=0$ ) y se tomó una imagen como se muestra en la Figura 26.

**Figura 26. Imagen de la grilla de ajedrez**



De la Figura 26 se puede apreciar, por medio de los rectángulos, que las aberraciones geométricas en el objetivo de la cámara son mínimas y las deformaciones en linealidad de la grilla no superan a un pixel de la imagen. Por lo anterior se obtuvieron los factores de conversión de pixeles a milímetros directamente de la imagen. Los factores encontrados para cada uno de los ejes son:

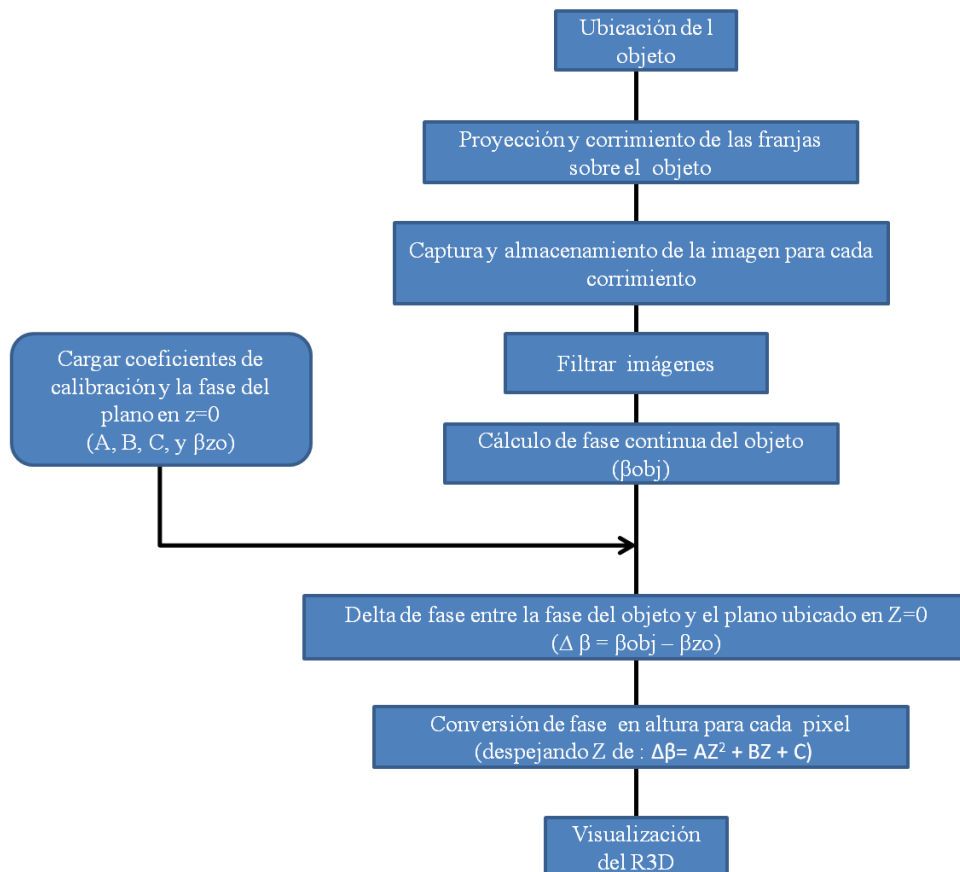
$$FC_x = FC_y = 0.094 \text{ mm/pixel} \quad (10)$$

El factor de conversión para el eje X es idéntico al obtenido para el eje Y, lo cual se debe a que el tamaño horizontal y vertical de un pixel de la cámara es igual, como se mostró en la tabla de características de la misma.

### 4.3 METODOLOGÍA DE RECONSTRUCCIÓN

a metodología para la reconstrucción tridimensional de la superficie de la tubería constó del siguiente procedimiento: ubicación del objeto, proyección y corrimiento de las franjas sobre la superficie del objeto, captura y almacenamiento de la imagen para cada corrimiento de las franjas, filtrado de las imágenes, cálculo de la fase continua del objeto, delta (diferencia) entre la fase continua del objeto y la fase continua del plano de referencia ubicado en  $Z=0$ , conversión de fase en altura para cada pixel y finalmente visualización de la reconstrucción tridimensional del objeto. El diagrama de bloques de la metodología de reconstrucción se puede ver en la Figura 27. A continuación se describen cada una de las etapas indicadas.

**Figura 27. Metodología de reconstrucción**



#### **4.3.1 Ubicación del objeto a reconstruir.**

Previo a la ubicación del objeto para su reconstrucción, se debe realizar la preparación del mismo para garantizar una superficie limpia, de baja reflectividad y un buen contraste con las franjas proyectadas.

Para el caso de la reconstrucción de la superficie de una tubería; la preparación de la zona corroída que se desea reconstruir, se puede realizar aplicando alguno de los métodos de limpieza comúnmente utilizados en la industria como son: Limpieza con lanilla, aplicación de grata, sandblasting ó lija 600 de forma suave sobre la superficie con el fin de eliminar el óxido de la misma y retirar el material suelto de la superficie del tubo.

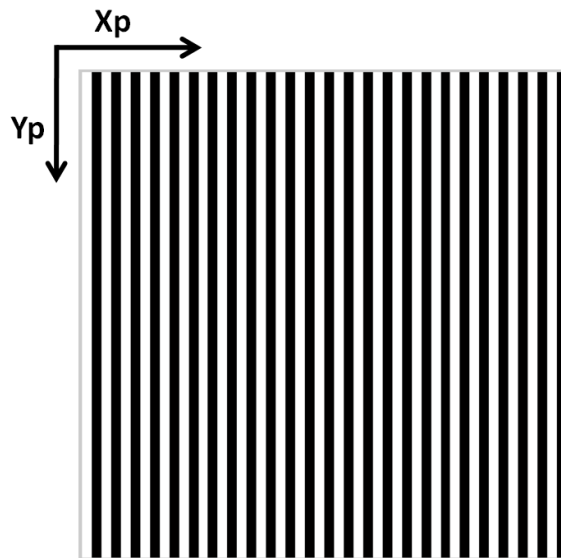
Si la superficie a reconstruir es muy brillante se puede aplicar revelador de líquidos penetrantes para quitar el brillo debido a que se genera una película de color blanco mejorando el contraste de las franjas. La aplicación del revelador no altera las propiedades físicas ni mecánicas de la tubería y es de fácil remoción, aunque se debe tener cuidado en su aplicación para no ocultar detalles de la topografía del objeto por acumulación del mismo en los huecos.

Una vez preparada la superficie se debe ubicar en la posición del plano de referencia asegurando, que el eje longitudinal de la tubería quede paralelo al eje Y de la cámara y que la región de interés se encuentre dentro del volumen de calibración, evitando inclinaciones respecto a la cámara, además se debe tener cuidado que no se presenten discontinuidades en las franjas proyectadas sobre la superficie, para no generar errores en el cálculo de la fase.

#### 4.3.2 Proyección del patrón de franjas y captura de la imagen para cada corrimiento

Las franjas proyectadas sobre la superficie del objeto a reconstruir, se generaron a partir de un algoritmo desarrollado en Matlab, el cual permite controlar el paso y el corrimiento de las mismas. Este algoritmo genera una matriz con columnas en uno y columnas en cero de igual tamaño e intercaladas entre sí, para representar las franjas blancas y negras respectivamente. En la Figura 28 se observa el patrón de franjas generado.

Figura 28. Patrón de franjas generado.

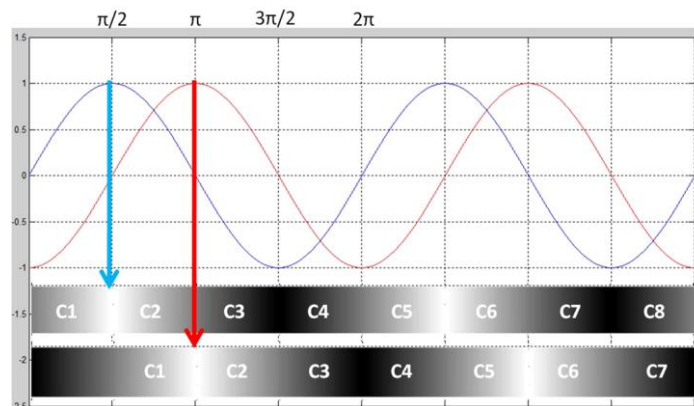


Para obtener una mayor sensibilidad en el sistema de reconstrucción, el ancho de las franjas corresponde a dos elementos de la matriz. Es decir las franjas blancas son representadas por dos elementos de la matriz en uno y las franjas negras por dos elementos en cero. Por lo anterior se tiene que el periodo del patrón de franjas es igual a cuatro elementos de la matriz.

Debido a que el perfil del patrón de franjas generado tiene forma de onda cuadrada y no sinusoidal como se recomienda por la teoría de franjas, se genera un leve desenfoque en el videobeam para obtener una transición suave entre las franjas. De esta forma y aplicando un filtrado en frecuencia se corrige dicho perfil de las franjas proyectadas sobre la superficie del objeto a reconstruir [30].

Asumiendo un perfil sinusoidal y debido a que el periodo de las franjas generadas es de cuatro elementos como se dijo anteriormente, para generar un corrimiento de  $\pi/2$  en la fase de las franjas, basta con generar un corrimiento de las columnas de la matriz en un elemento hacia la derecha como se observa en la Figura 29.

**Figura 29. Corrimiento de  $\pi/2$  del patrón de franjas.**



El tamaño de la matriz es 600X800 (filas,columnas) lo cual corresponde al tamaño de pantalla del videobeam utilizado, con el fin de evitar distorsión en el ancho de las franjas al proyectarlas.

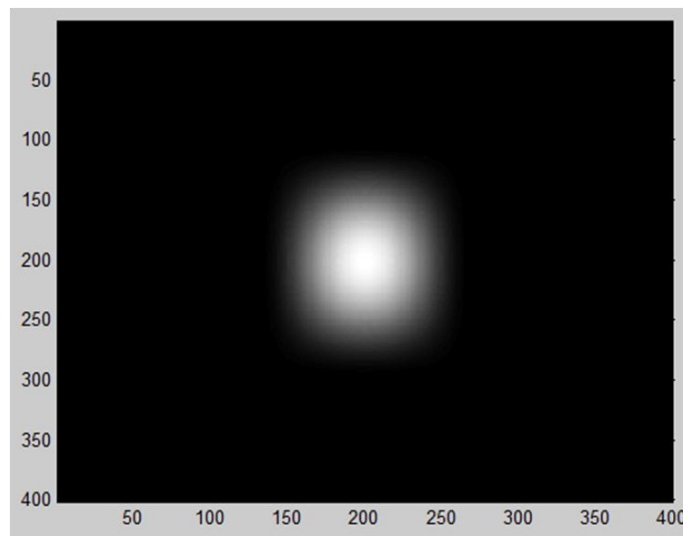
Una vez generado el patrón de franjas, se procede a proyectarlo sobre la superficie del objeto por medio del videobeam y a capturar la imagen para cada uno de los corrimientos del mismo. Como se mencionó en el capítulo 2 se realizan cuatro corrimientos del patrón de franjas a intervalos de  $\pi/2$  y la imagen capturada

de cada corrimiento se almacena en la memoria del computador con el nombre de *IO1, IO2, IO3, IO4* (en formato *.bmp*) respectivamente.

### 4.3.3 Filtrado de las imágenes

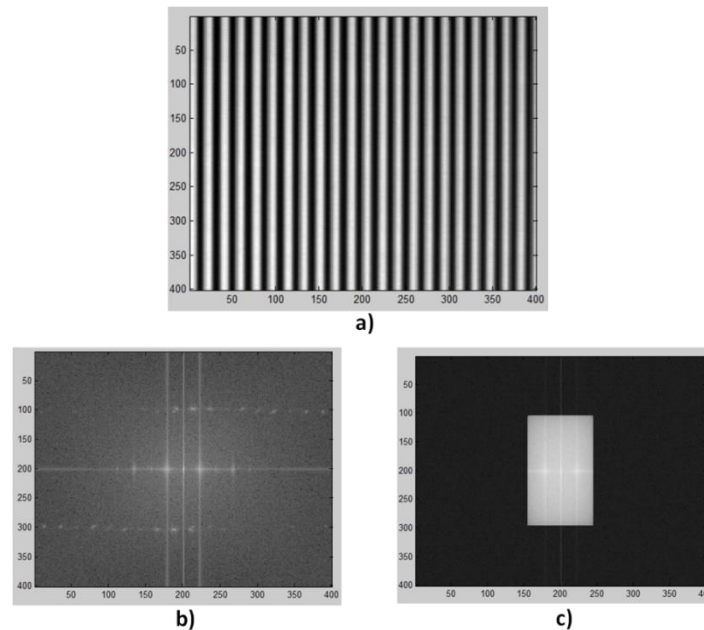
A las imágenes capturadas del objeto con las franjas proyectadas, se le realiza un filtrado para eliminar los armónicos de la componente fundamental y obtener un perfil sinusoidal de las mismas. El filtro empleado es un filtro digital mediante el método de ventana *Hanning*, como se observa en la Figura 30.

**Figura 30. Máscara del filtro.**



La aplicación del filtro se realiza con el fin de seleccionar la frecuencia fundamental de la transformada de Fourier del patrón de franjas y eliminar los demás armónicos que pueden causar errores al calcular la fase del objeto. En la Figura 31 se muestra la proyección de las franjas sobre el plano de referencia y la aplicación del filtro.

**Figura 31. Filtrado de las franjas. a) Proyección de franjas sobre el plano, b) Transformada de Fourier, c) Aplicación del filtro.**



#### 4.3.4 Cálculo de la fase continua del objeto.

La fase continua del objeto se obtiene mediante un algoritmo desarrollado en Matlab, empleando la ecuación (8) para obtener la fase (discontinua) del objeto y el algoritmo de desdoblamiento descrito en el marco teórico.

#### 4.3.5 Conversión de fase en alturas

Una vez obtenida la fase continua del objeto, se realiza la diferencia de ésta con la fase continua del plano de referencia para obtener un delta de fase y mediante los coeficientes de calibración obtenidos, se encuentra la distribución de altura para la topografía del objeto. Esto se logra despejando Z de la ecuación (9) como se muestra a continuación:

$$Z = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4A(C - \Delta\beta)}}{2A} \quad (11)$$

De la ecuación (11) se tiene la altura para dada pixel de la topografía del objeto y la reconstrucción tridimensional del mismo se puede visualizar en Matlab.

#### **4.4 APLICACIÓN Y VALIDACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA.**

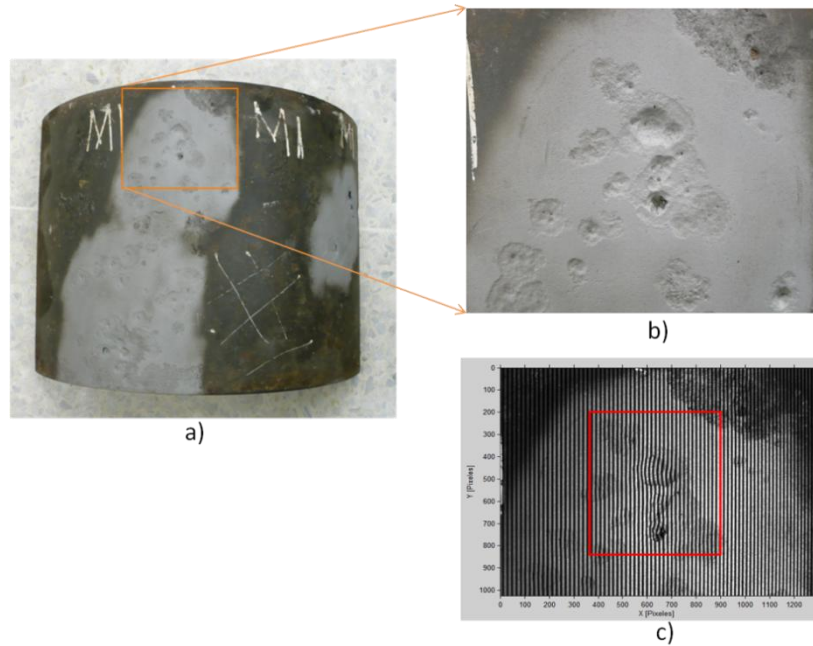
En esta sección se presenta la aplicación de la metodología propuesta sobre la superficie externa de una tubería corroída, con el fin de validar la capacidad del sistema implementado en la reconstrucción tridimensional de la misma. Se llevó a cabo la medición de parámetros con el sistema y se realizaron comparaciones con resultado obtenido empleando otros sistemas de medida. Finalmente se realizó la caracterización del sistema.

##### **4.4.1 Reconstrucción tridimensional de la superficie corroída de una tubería.**

La aplicación de la metodología de reconstrucción se muestra a continuación, ejemplificando los principales pasos de la misma para la reconstrucción tridimensional de la superficie externa de una sección de tubería de muestra.

La preparación de la zona corroída de la tubería a reconstruir, se realizó aplicando sandblasting para limpiar la superficie y retirar el óxido como se muestra en la Figura 32.

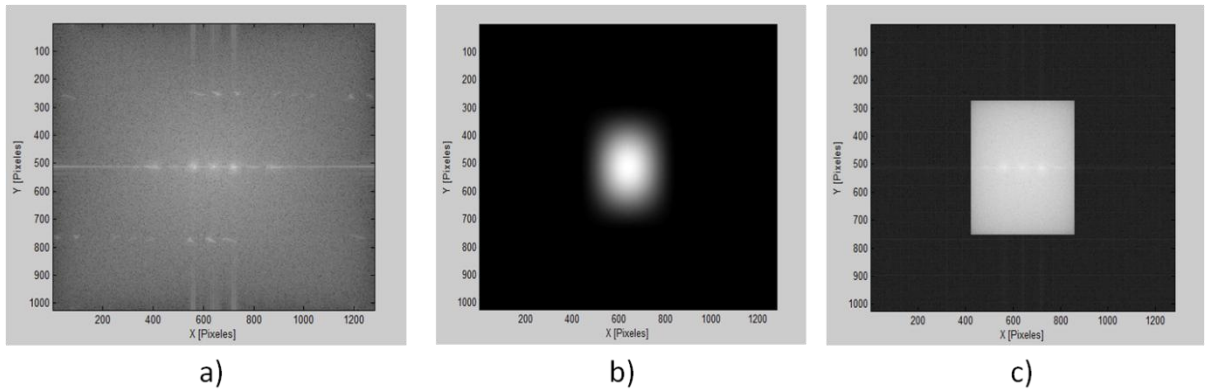
**Figura 32. Sección de tubería a) Fotografía, b) Ampliación del detalle, c) Franjas proyectadas**



En la Figura 32a se observa la sección de tubería de muestra (donación del Instituto Colombiano del Petróleo) cuyo diámetro nominal es de 16" (406,4 mm) y espesor 0.342" (8.68 mm). La región dentro del rectángulo de color naranja fue la capturada por la cámara como se observa en la Figura 32c y la región seleccionada para la reconstrucción fue la encerrada por el rectángulo de color rojo donde se encuentran los huecos de mayor profundidad.

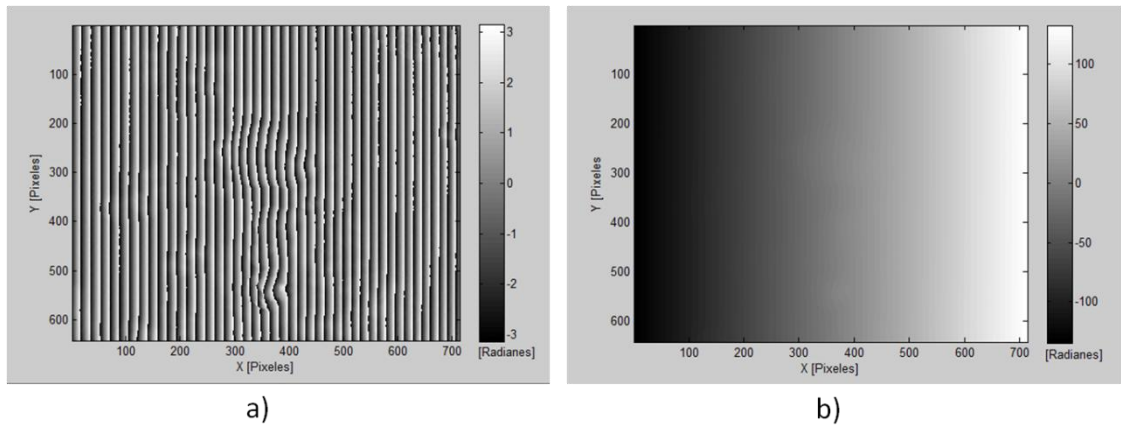
Sobre la región del cuadrado naranja se proyectó el patrón de franjas, se capturaron las cuatro imágenes correspondientes a cada uno de los corrimientos del patrón y se les realizó el filtrado en frecuencia. En la Figura 33 se muestra el filtro empleado.

**Figura 33. Filtrado del objeto, a) Transformada de Fourier de la imagen del objeto, b) mascara del filtro y c) Frecuencias seleccionadas.**



De las imágenes filtradas se obtuvo la fase discontinua del objeto y aplicando el algoritmo de desdoblamiento se cálculo la fase continua respectiva como se observa en la Figura 34.

**Figura 34. Fases del objeto, a) discontinua, b) continua.**

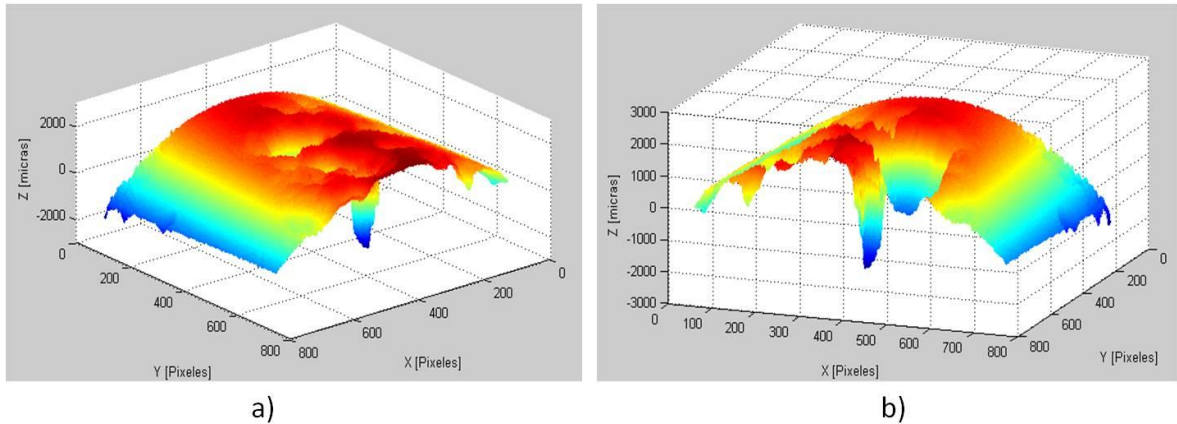


Se cálculo el delta de fase mediante la diferencia entre la fase continua del objeto y la del plano de referencia. A partir de ésta y los coeficientes de calibración se obtuvo la reconstrucción tridimensional, calculando la altura para cada pixel.

En la Figura 35 se muestran dos vistas de la reconstrucción tridimensional obtenida para la región de la tubería seleccionada, en la cual se aprecia la topografía de la superficie y las discontinuidades del área corroída así como la

variación de alturas indicada por los diferentes colores. Las unidades de la coordenada Z se encuentra en micrómetros y la profundidad de los huecos se puede determinar a partir de las lecturas sobre el mismo eje o mediante el uso de perfiles sobre la imagen.

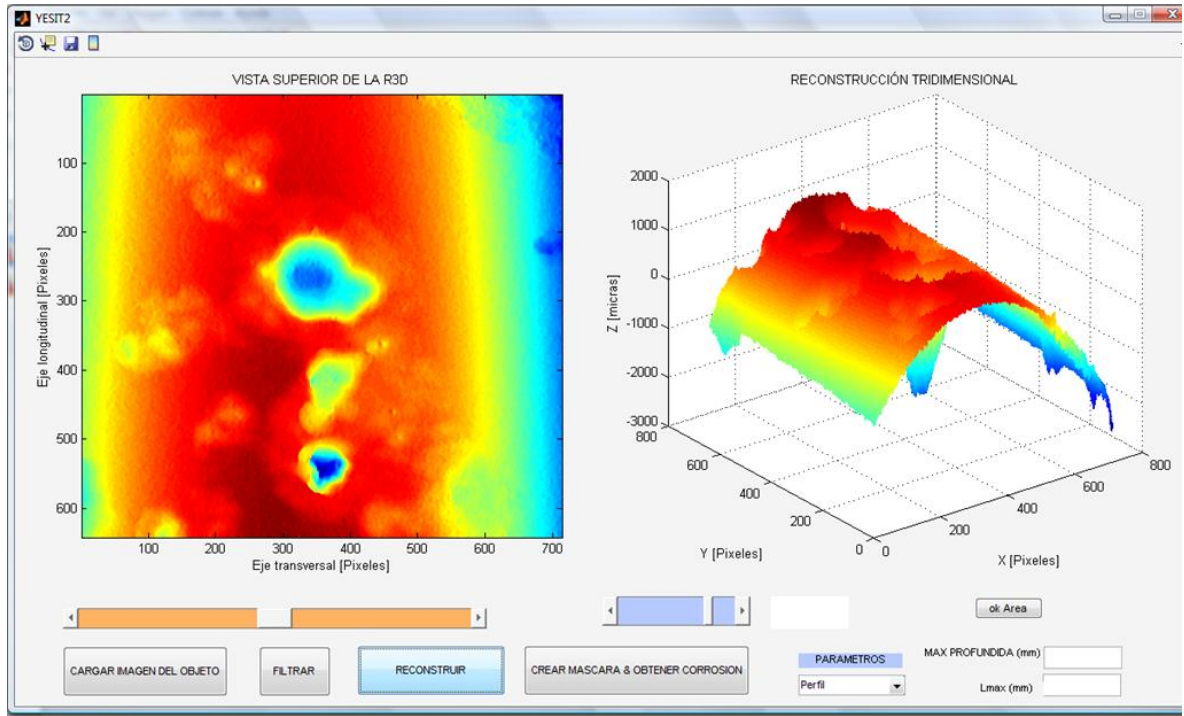
**Figura 35. Reconstrucción tridimensional, a) vista 1, b) vista 2**



#### 4.4.2 Medición de parámetros.

Para la medición de los parámetros se desarrollo una interface gráfica de usuario en Matlab. Esta interface permite la reconstrucción tridimensional paso a paso de la superficie del objeto, la interacción del usuario en la creación del filtro y la obtención de los parámetros. En la Figura 36 se observa la interface gráfica de usuario desarrollada.

**Figura 36. Interface gráfica para la reconstrucción tridimensional.**



Para realizar la reconstrucción tridimensional de un objeto mediante el uso de la interface, se deben guardar las imágenes de cada uno de los corrimientos del patrón de franjas (*IO1*, *IO2*, *IO3* e *IO4*), en el mismo archivo donde se encuentran los algoritmos desarrollados para el cálculo de la fase discontinua, fase continua, filtrado y los coeficientes de calibración del sistema.

El procedimiento de reconstrucción se realiza pulsando los botones de la interface en orden que se muestra en la parte inferior de la misma: *Cargar imagen del objeto*, *Filtrar*, *Reconstruir*. La medición de los parámetros se realiza a partir de imagen de la corrosión obtenida al pulsar el botón “*Crear Máscara & Obtener corrosión*”.

La función de cada uno de los controles de la interface mencionados se describe a continuación:

**Cargar imagen del objeto:** Permite al usuario seleccionar y cargar una de las cuatro imágenes del objeto a reconstruir para visualizarla en pantalla.

**Filtrar:** Al pulsar este control se abre una pantalla con la transformada de Fourier de la imagen del objeto cargada previamente y le permite al usuario seleccionar el tamaño de la ventana del filtro por medio del mouse del computador. Se recuerda que el fin del filtrado es eliminar las componentes armónicas de la frecuencia fundamental a partir del tercer armónico. Como resultado de esta función se presenta la imagen de las franjas del objeto filtrada y la fase discontinua del mismo. Este procedimiento se puede realizar las veces que desee el usuario.

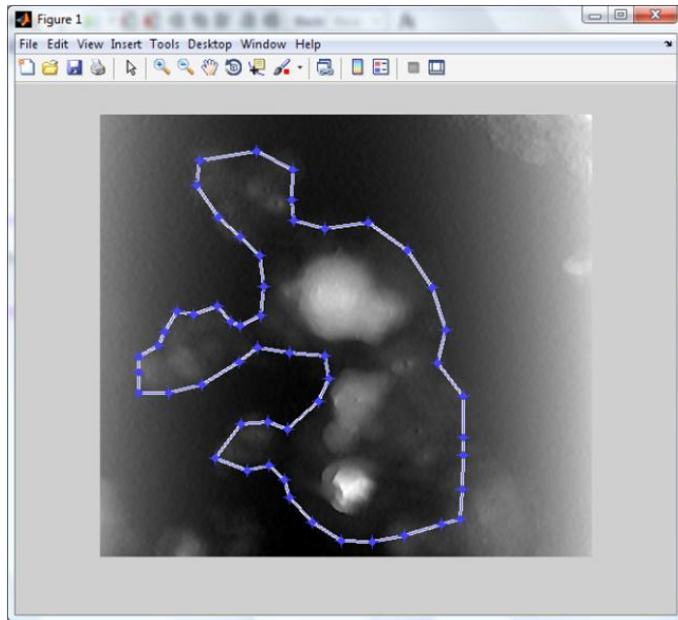
**Reconstruir:** Al pulsar este control se obtiene la reconstrucción tridimensional del objeto y se visualiza en pantalla.

**Crear Máscara & Obtener corrosión:** Al pulsar este control se abre una imagen de la superficie reconstruida en niveles de gris, en la cual el usuario debe seleccionar la región o regiones donde se encuentra la información de interés por medio del mouse del computador.

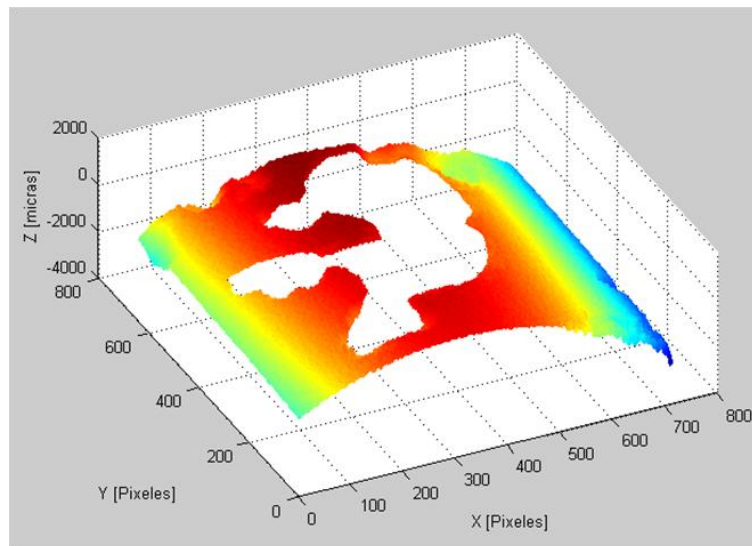
La Figura 37 muestra la creación de esta máscara sobre la reconstrucción de la sección de tubería del ítem anterior. En este caso la región de interés es donde se presenta la corrosión.

La función de la máscara es quitar los elementos de las regiones seleccionadas y remplazarlos por el comando “NaN” (Not-a-Number), el cual no asigna ningún número a los datos eliminados pero si mantiene su posición dentro de la imagen. En la Figura 38 se muestra la aplicación de la máscara sobre la reconstrucción de la tubería.

**Figura 37. Creación de la máscara**

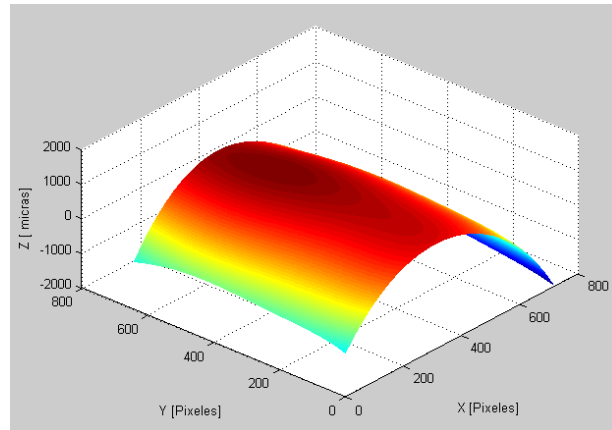


**Figura 38. Aplicación de la máscara sobre la reconstrucción**

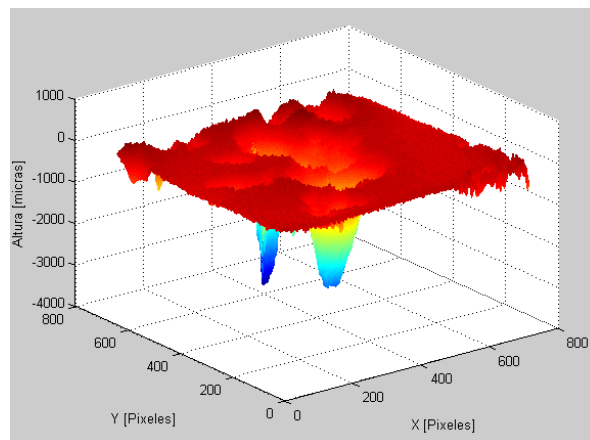


Una vez eliminadas las regiones de interés, se crea una superficie virtual de la tubería realizando regresión polinomial a los datos de la máscara creada como se observa en la Figura 39 y finalmente se realiza la diferencia entre la superficie virtual y la reconstrucción tridimensional original de la tubería, para obtener solamente las profundidades de la corrosión como se observa en la Figura 40.

**Figura 39. Superficie virtual**



**Figura 40. Profundidades de la corrosión.**



Del resultado obtenido se puede calcular la profundidad máxima de la corrosión, determinando el valor mínimo de la Figura 40. Otros valores de profundidades se pueden encontrar realizando lecturas directamente sobre la imagen o realizando perfiles sobre la misma.

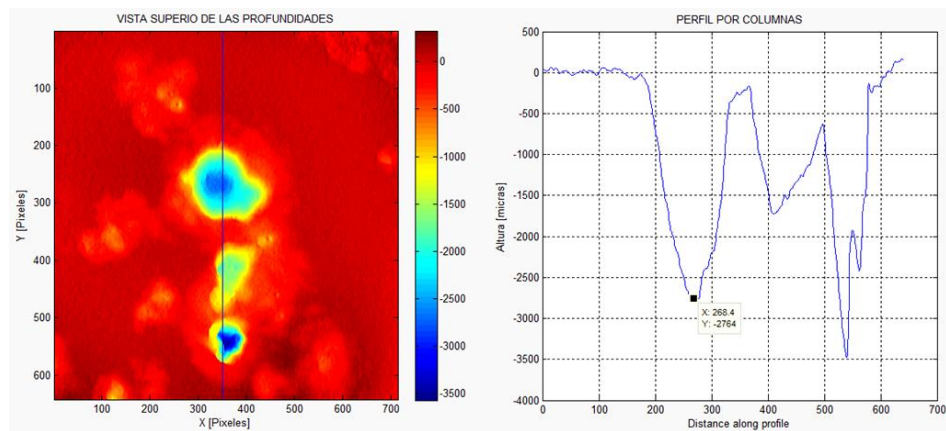
**4.4.2.1 Medida de profundidad de los huecos de la tubería reconstruida:** De la tubería de muestra se seleccionaron los tres huecos con mayor profundidad, como se muestra en la Figura 41 y se midió cada una de estas profundidades a partir del perfil sobre la reconstrucción tridimensional de la misma. El perfil sobre la máxima

profundidad encontrada para cada uno de los huecos H1, H2 y H3 se presenta en las Figuras 42 a 44 respectivamente.

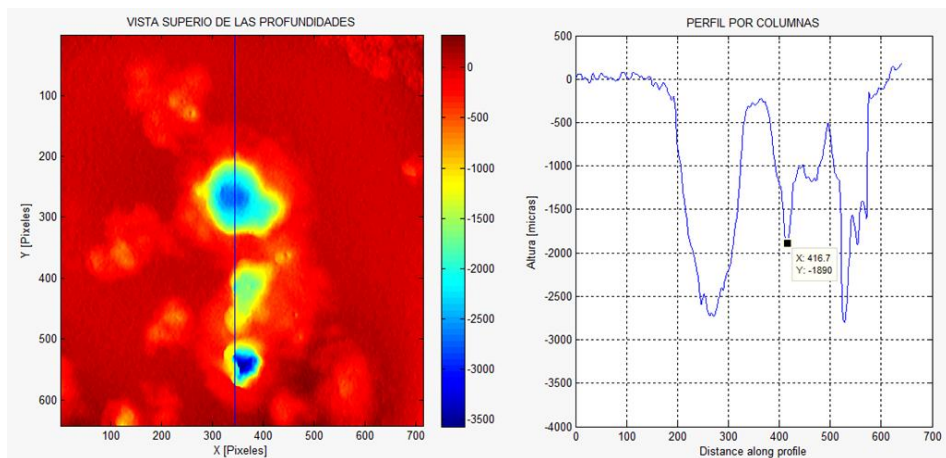
**Figura 41. Ubicación de los huecos seleccionados**



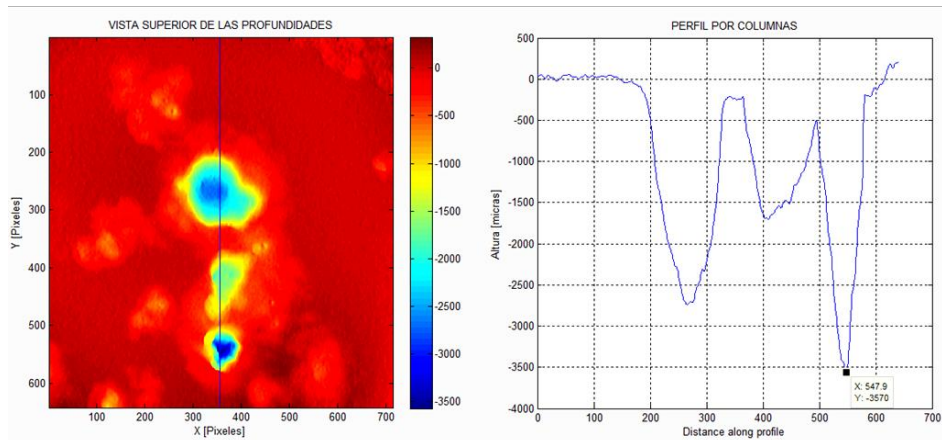
**Figura 42. Profundidad del hueco H1**



**Figura 43. Profundidad del hueco H2.**



**Figura 44. Profundidad del hueco H3**



La profundidad de los huecos se midió también empleando una galga de picado comúnmente utilizada por los técnicos e ingenieros en campo y por el método de ultrasonido por contacto, midiendo el espesor desde la parte interna de la tubería. Las medidas obtenidas por estos métodos y los errores relativos en comparación con las obtenidas del sistema óptico se presentan en la Tabla 4.

**Tabla 4. Medidas de profundidad de los huecos.**

<b>HUECO</b>	<b>GALGA</b> Res. (0.01in)		<b>ULTRASONIDO</b> Res. (0.01mm) (mm)	<b>S. ÓPTICO</b> Res. (0.01mm) (mm)	<b>ERROR</b> S.ópti/Galga	<b>ERROR</b> S.ópti/Ultras
	(mil)	(mm)				
<b>H1</b>	105±5	2.66±0.13	2.85±0.05	2.76±0.01	3.9%	-3.02%
<b>H2</b>	72±3.5	1.83±0.09	1.87±0.02	1.89±0.01	3.28%	1.07%
<b>H3</b>	138±7	3.51±0.18	3.59±0.01	3.57±0.01	1.7%	-0.56%

\*La medida reportada para la galga y el ultrasonido corresponde a valores promedio.

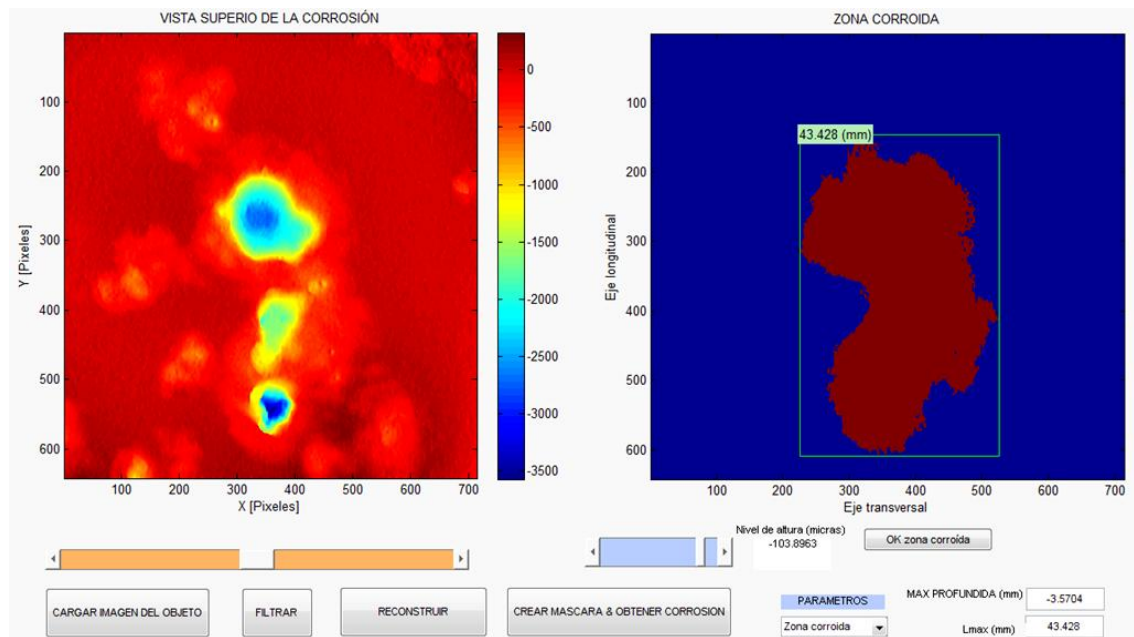
De la Tabla 4 se puede apreciar que los valores obtenidos por los tres métodos son muy aproximados, presentando menor error al comparar el sistema óptico con el método de ultrasonido.

La ventaja que presenta el sistema óptico respecto a los otros métodos mencionados es que se obtiene toda la topografía de la zona evaluada,

permitiendo realizar perfiles y no muestras discretas solamente. Esto es muy importante en el análisis de integridad ya que se requiere de mapas de corrosión de la zona evaluada.

**4.4.2.2 Medida de la longitud del área corroída:** Debido a que la corrosión no tiene una forma definida, se deja a criterio del usuario la determinación de la zona corroída a partir de la interface desarrollada. El usuario por medio de un *slider* (barra deslizante) define un nivel de altura a la cual se considera que empieza la zona corroída, diferenciándola de la rugosidad propia de la tubería. Una vez seleccionado el nivel se pulsa el control “ok zona corroída”, el cual muestra en pantalla la zona de mayor longitud respecto al eje Y (eje longitudinal de la tubería), encerrada en un rectángulo con el valor de la longitud en milímetros en la parte superior izquierda del mismo. En la Figura 45 se presenta como ejemplo la determinación de la zona corroída en la tubería reconstruida y el valor de su longitud máxima proyectada sobre el eje longitudinal.

**Figura 45. Selección de la zona corroída.**



En la Figura 45 se aprecia solamente la zona de mayor longitud y que contiene la máxima profundidad de la corrosión como se especifica en el código ASME B31G.

#### **4.4.3 Caracterización del sistema implementado.**

En esta sección se presentan algunas pruebas realizadas con el sistema óptico implementado, para determinar el área mínima distinguible en la superficie reconstruida así como el cambio en altura (perdida de espesor) mínima que el sistema puede resolver.

**4.4.3.1 Determinación del área mínima distinguible:** Para determinar la capacidad real del sistema implementado, en la reconstrucción de pequeñas áreas, se realizó la reconstrucción de indicadores de calidad de imagen (IQI), comúnmente utilizados en radiografía, con dimensiones definidas por el código ASME y la norma ASTM.

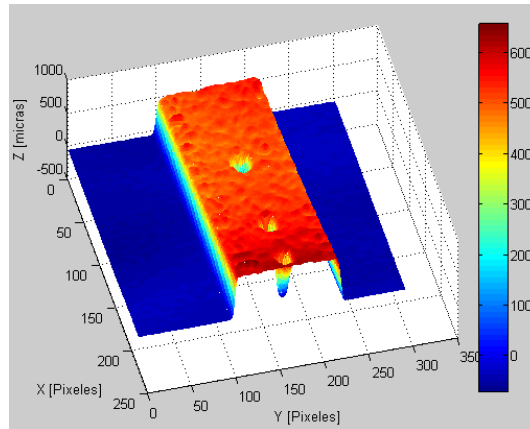
El primer indicador utilizado se puede observar en la Figura 46, el cual está diseñado según el código ASME. El material de fabricación es acero inoxidable, con un espesor ( $t$ ) de 0.020 in y presenta tres orificios en su interior. De los tres orificios, el mayor presenta un diámetro de cuatro veces el espesor ( $4t$ ) y los otros dos tienen un diámetro igual a tres veces el espesor ( $3t$ ).

**Figura 46. Indicador de calidad ASME 8.**



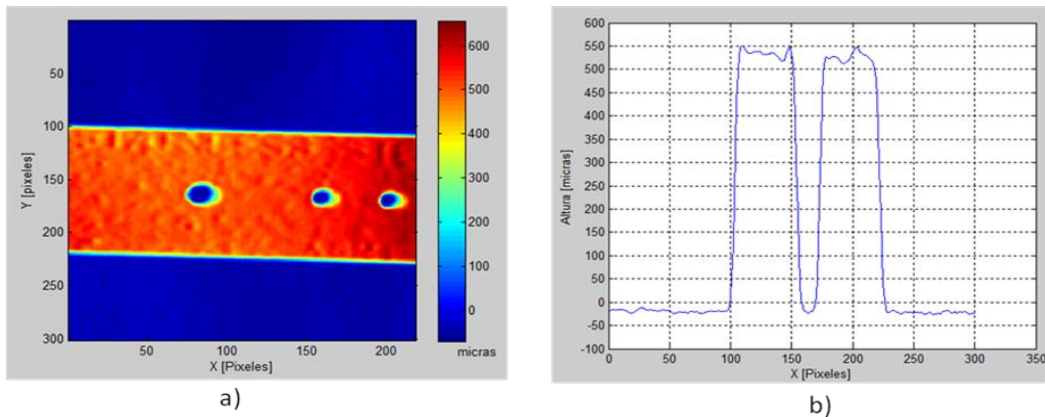
Para llevar a cabo la reconstrucción tridimensional del indicador, se pegó sobre el plano de referencia y aplicando la metodología descrita se obtuvo su reconstrucción como se observa en la Figura 47.

**Figura 47. Reconstrucción del IQI ASME8**



De la Figura 47 se puede apreciar claramente la diferencia de altura del IQI respecto al plano de referencia (color azul). De la vista superior de la reconstrucción como se muestra en la Figura 48, se observa que los tres orificios se logran reconstruir y diferenciar. Al trazar un perfil por la mitad del orificio de mayor diámetro, se determina la profundidad del mismo, la cual corresponde al espesor del indicador.

**Figura 48. Altura del IQI ASME8, a) Vista superior, b) Perfil sobre el primer orificio.**



La altura promedio en de la superficie reconstruida de 530.4 micras y una desviación estándar de 11.5 micras.

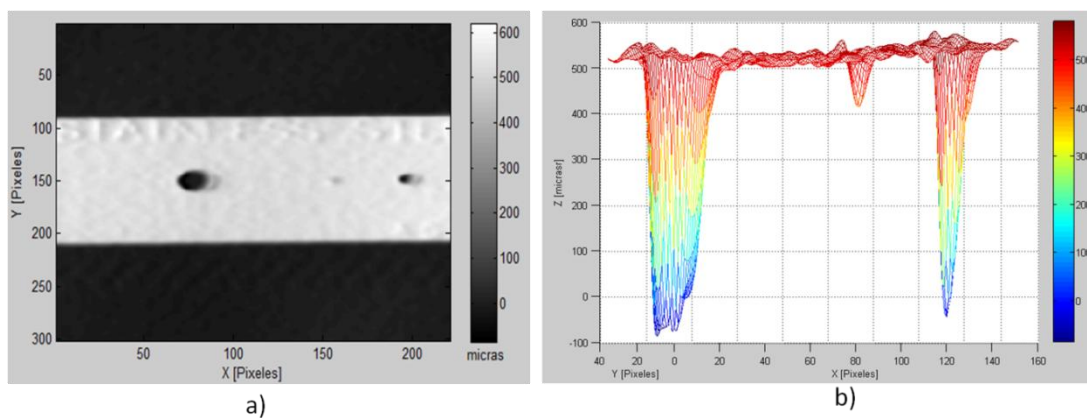
Como el anterior indicador se reconstruyó sin problemas, se utilizó un segundo indicador diseñado según la norma ASTM. El material de fabricación es acero inoxidable, con un espesor de 0.020 in (t) y presenta tres orificios en su interior con diferentes diámetros como se observa en la Figura 49, de izquierda a derecha se observan los orificios con diámetros de cuatro veces el espesor (4t), una vez el espesor (1t) y dos veces el espesor (2t).

**Figura 49. Indicador de calidad ASTM**



Al igual que en el caso anterior, el indicador se pegó sobre el plano de referencia para obtener su reconstrucción tridimensional, la cual se puede apreciar en la Figura 50.

**Figura 50. Reconstrucción del IQI ASTM**



En la Figura 50a se muestra la vista superior de la reconstrucción, en niveles de gris para una mejor visualización de la ubicación de los orificios, de la cual se puede apreciar que el orificio de menor diámetro no se alcanza a reconstruir en su totalidad, presentando error en la medición de la profundidad como se puede ver en la Figura 50b.

Por lo anterior se concluye que el sistema implementado permite resolver discontinuidades con diámetros de hasta 1 mm. Diámetros menores no se logran resolver debido a que las franjas proyectadas no pueden penetrar hasta el fondo del orificio.

**4.4.3.2 Altura mínima que se puede resolver el sistema:** Para verificar la altura mínima que se puede resolver con el sistema, se utilizó una galga con un espesor de 0.0015 in (0.038 mm) marca *KD-TOOLS LANCASTER*, la cual se muestra en la Figura 51.

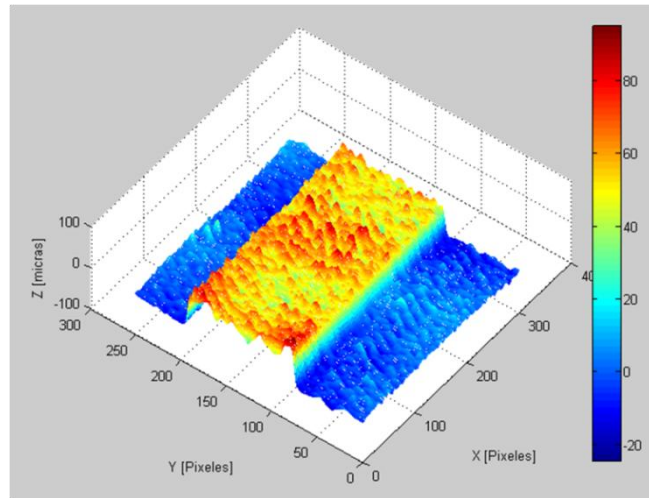
**Figura 51. Galga con espesor original de 38 $\mu$ m**



Para la reconstrucción de la galga, se aplicó revelador de líquidos penetrantes sobre la superficie con el fin de eliminar el brillo y se pegó sobre el plano de referencia para la proyección de las franjas.

La reconstrucción obtenida se muestra en la Figura 52, en la cual se puede apreciar la rugosidad en la superficie, debido a la capa de revelador aplicado. La media de las alturas de la galga reconstruida es de 52.27  $\mu\text{m}$  con una desviación estándar de 9.6  $\mu\text{m}$ .

**Figura 52. Reconstrucción de la galga.**

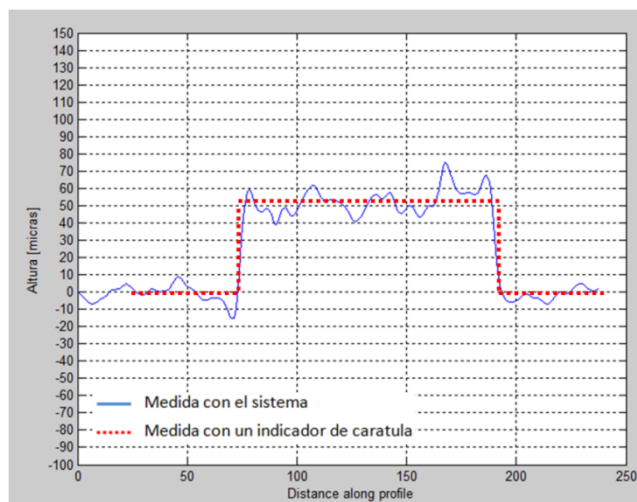


La altura medida con el sistema, no corresponde al espesor original de la galga, debido a que ésta se pegó sobre el plano de referencia y se la aplicó revelador, por lo cual se procedió a calcular la altura real de la galga ubicada sobre el plano, utilizando un indicador de caratula con precisión de 0.002 mm como se muestra en la Figura 53. La altura promedio obtenida con el indicador de caratula fue de 50.2  $\mu\text{m}$  y la comparación de esta medida con un perfil de la reconstrucción se observa en la Figura 54.

**Figura 53. Medición de la galga con el indicador de caratula**



**Figura 54. Medidas de la galga.**



De lo anterior se estima que el sistema implementado puede resolver alturas de  $50 \mu\text{m}$  con una desviación estándar de  $\pm 10 \mu\text{m}$ .

## 5. CONCLUSIONES

El desarrollo de ésta investigación permitió la realización de pruebas a nivel de laboratorio de las técnicas de ultrasonido por inmersión y radiografía industrial, donde se comprobó su capacidad en la detección y cuantificación de discontinuidades generadas por corrosión (perdidas de espesor), sobre la superficie externa de una probeta tubular con defectos artificiales así como su limitada viabilidad de aplicación en campo.

De la revisión de las principales características de las técnicas no destructivas existentes, para la evaluación de la corrosión en tuberías y la obtención de mapas de corrosión, se concluyó que los sistemas ópticos son la mejor alternativa para la reconstrucción tridimensional de zonas corroídas en la superficie externa de tuberías.

Se implementó un sistema óptico a nivel de laboratorio, empleando la técnica de proyección de franjas y se validó su capacidad de reconstrucción tridimensional de zonas corroídas sobre la superficie externa de una tubería de muestra.

Se diseñó una metodología de reconstrucción no destructiva y mediante el desarrollo e implementación de algoritmos para el tratamiento digital de imágenes, se logró la representación tridimensional de discontinuidades generadas por corrosión.

Se realizó el dimensionamiento, a partir de la reconstrucción tridimensional de zonas corroídas, de los principales parámetros para el análisis de integridad de tuberías como la máxima profundidad de la corrosión y su longitud máxima proyectada sobre el eje longitudinal.

La medida de profundidades obtenida por el sistema óptico de la zona reconstruida, se comparó con dos métodos comúnmente empleados en la industria como son: el uso de galgas de picado y ultrasonido por contacto. Los errores encontrados con respecto a las mediciones hechas con la galga de picado fueron de hasta el 3.9%, mientras que para el ultrasonido fueron del 3.02%. Por lo anterior se concluye que las mediciones con el sistema óptico son aceptables y además éste presenta mayor información de la zona corroída.

De la caracterización del sistema óptico implementado se determinó que se pueden detectar discontinuidades pequeñas con diámetros de hasta un milímetro y medir pérdidas de espesor con una resolución del orden de las cincuenta micras (50 $\mu$ m).

Aunque la técnica empleada presenta amplias ventajas en cuanto a la resolución, reconstrucción tridimensional, su rapidez de respuesta y los bajos costos de implementación, presenta limitación en la detección y cuantificación de corrosión localizada (picado) por lo cual se hace necesario aplicar técnicas complementarias para una evaluación completa de la tubería.

## **5.1 APORTES**

Se destaca la participación en el “V Congreso Internacional de Materiales”, realizado por la Universidad del Valle y la Pontificia Universidad Javeriana de Cali, los días del 12 al 16 de octubre de 2009, en la ciudad de Santiago de Cali, y la generación de un (1) artículo para las respectivas memorias de la ponencia bajo registró ISBN 978-958-8338-68-2

Como productos directos del presente trabajo de investigación se destaca la realización de tres (3) proyectos de pregrado. Uno (1) con la Escuela de Ingeniería Electrónica en el área de tratamiento digital de imágenes [38] y dos (2) en la

escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales en el área de Ensayos No Destructivos [35], [36].

Adicionalmente como productos directos de las tesis de pregrado finalizadas (en la modalidad de artículo), se destaca la generación de dos (2) artículos, en proceso de revisión para futuras publicaciones [35], [38].

El desarrollo de la presente investigación permitió establecer vínculos entre el Instituto Colombiano del Petróleo y la UIS, además de la realización de trabajo interdisciplinario entre tres grupos de investigación de la universidad: CEMOS, GIMAT y GOTS.

## **5.2 RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS**

Se recomienda reemplazar el videobeam y la cámara por un sistema integrado de menor tamaño que permita variar su posicionamiento y realizar la captura de la información en diferentes ángulos y distancias respecto a la pieza que se desea reconstruir.

El presente trabajo representa un primer paso en la línea de investigación del diseño, desarrollo e implementación de dispositivos, de aplicación en campo, para captura de información y análisis de la integridad de tuberías en servicio, mediante la aplicación de modelos estandarizados como son ASME B31G Modificado, API 570, DNV RPF101 entre otros.

Implementación de dispositivos y desarrollos de sistemas para la transmisión remota de la información de las zonas corroídas reconstruidas en campo, hacia centrales de evaluación de información y retorno de las acciones correctivas

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] R. Forbes and R.N. Earle, "External corrosion direct assessment- a case study.," pp. 1-8.
- [2] D. Norman and W. Quay, "Pipeline coatings, external corrosion and direct assessment.," *Stress: The International Journal on the Biology of Stress*, pp. 1-16.
- [3] ASME-B31G, *Manual for determining the remaining strength of corroded pipelines.*, 2004.
- [4] DNV-RP-F101, *Corroded pipelines recommended practice*, 2004.
- [5] ASME-B31.8, *Gas transmission and distribution piping system*, 2000.
- [6] R. Echevarria, *Ultrasonido*, Universidad Nacional del Comahue, Facultad de Ingeniería: 2002.
- [7] N.C. Vera, J.Y. Dedios, and D.R. Morales, "El ultrasonido y su aplicación," *Revista de la Facultad de Ingeniería Industrial*, vol. 8, 2005, pp. 25-28.
- [8] E.M. Martínez, "Métodos de Inspección para la Corrosión por Debajo del Aislamiento," 2000, pp. 1-6.
- [9] J. Rose and J. Royer, "Guide wave testing of buried pipe," *Materials Evaluation*, vol. 67, 2009, pp. 1387-1391.
- [10] B. Dai, S. Sheng, X. Tian, Z. Yang, and Z. Xie, "Research on Multi-probe Ultrasonic Automated In-line Inspection System of Pipeline Corrosion," 2007, pp. 3105-3110.
- [11] F. Gomez, K. Althoefer, and L.D. Seneviratne, "Modeling of Ultrasound Sensor for Pipe Inspection," *Mechanical Engineering*, 2003, pp. 2555-2560.
- [12] D.A.I. Bo, Z. Huiping, S. Sha, and T. Jian, "Research on Ultrasonic Inspection of Pipeline Corrosion," *Control*, vol. 00, 2007, pp. 2572-2575.
- [13] M. Uesaka, K. Hakuta, K. Miya, K. Aoki, and A. Takahashi, "Eddy-Current Testing by Flexible Microloop Magnetic Sensor Array," vol. 34, 1998, pp. 2287-2297.
- [14] V. Bilas, D. Ambruš, and A. In, "Pulsed Eddy-Current Nondestructive Testing of Ferromagnetic Tubes," *Instrumentation*, vol. 53, 2004, pp. 1289-1294.

- [15] D. Hagemaiier, "Eddy current depth of penetration," *Materials Evaluation*, 2004, pp. 1028-1030.
- [16] J.R. Navas Olalla and S.G. Solis Solis, "Evaluación de defectos por corrosión en líneas de transporte de hidrocarburos.," 2007.
- [17] A.E. Crouch and T.H. Goyen, "Defect assessment using conformable array data.," *Southwest Research Institute*, 2003, pp. 1-33.
- [18] A.S.F. Metals, "Nondestructive evaluation and quality control.," *Metal Handbook*, vol. 17, 1999, pp. 1-100.
- [19] S. Lee and B. Jang, "Thickness evaluation of pipes using density profile on radiographs," *10th Asia-Pacific Conferance on Non-Destructive Testing.*, 2001, pp. 1-5.
- [20] P.R. Vaidya, B. Atomic, T. Atomic, and E. Authority, "Radiographic Evaluation of Corrosion and Deposits in Pipelines : Results of an IAEA Co-ordinated Research Programme," *Atomic Energy*, 2006, pp. 1-14.
- [21] J. Zirnhelt, I. Einav, I. Atomic, E. Agency, P.O. Box, and S. Infanzón, "Radiographic Evaluation of Corrosion and Deposits : An IAEA Co-ordinated Research Project," *Atomic Energy*, 2003.
- [22] E.M. Souza, S.C.A. Correa, A.X. Silva, R.T. Lopes, and D.F. Oliveira, "Methodology for digital radiography simulation using the Monte Carlo code MCNPX for industrial applications," *Applied Radiation and Isotopes*, vol. 66, 2008, pp. 587-592.
- [23] F.J. Carrión Viramontes, M.G. Lomelí González, J.A. Quintana Rodríguez, and M. Martínez Madrid, "La evaluación no destructiva de materiales estructurales y puentes," 2003, pp. 1-202.
- [24] N. Rastkhah, K. Edalati, A. Kermani, M. Seiedi, and A. Movafeghi, "Corrosion evaluation of pipes by radiography," *Safety and Radiation Protection Technological Center*, vol. 3, 2000, pp. 6-11.
- [25] K.E. Ñ, N. Rastkhah, A. Kermani, M. Seiedi, and A. Movafeghi, "The use of radiography for thickness measurement and corrosion monitoring in pipes," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, vol. 83, 2006, pp. 736-741.
- [26] W.O. Acosta Freire and E.R. Salazar Balladares, "Optimización de procedimientos de inspección para tuberías de perforacion, producción y

revestimiento de pozos petroleros utilizando ensayos no destructivos.,” 2007.

- [27] E.N. Hogert, M.R. Landau, M.F. Ruiz Gale, R. Aparicio, and N.G. Gaggioli, “Un nuevo método óptico de END para analizar superficies erosionadas.,” pp. 1-6.
- [28] Z.M. Pérez Guzmán and L.A. Romero Pérez, “Sistema óptico de reconstrucción tridimensional para la detección de ampollas en recubrimientos,” 2004.
- [29] Z.M. Pérez Guzmán, “Aproximación espacio-temporal para la medida absoluta de la forma 3D de un objeto por proyección de franjas.,” 2006.
- [30] D.A. Gómez Tejada, “Dispositivo óptico para la reconstrucción tridimensional de la piel humana por el método de proyección de franjas.,” 2009.
- [31] J. Meneses, T. Gharbi, J.Y. Cornu, and R.D. Gray, “Three-dimensional optical profilometry for knee prosthesis wear measurement .,” vol. 36, 2003, pp. 127-131.
- [32] L.L. Deck, Z. Corporation, and L.B. Road, “Measurements using Fourier Transform Phase Shifting Interferometry,” vol. 1.
- [33] O.J. Rincon, J. Nicholls, and P. Gaviria, “Proyección de Franjas con Corrimiento de Fase : Aplicación a las Ciencias Forenses,” *Redalyc*, vol. Vol 7, 2009, pp. 1-8.
- [34] J. Meneses, T. Gharbi, and P. Humbert, “Phase-unwrapping algorithm for images with high noise content based on a local histogram.,” *Applied optics*, vol. 44, Mar. 2005, pp. 1207-15.
- [35] L.C. Olarte Sánchez and D.A. Vanegas Moreno, “Digitalización de imágenes radiográficas para la identificación y caracterización de discontinuidades superficiales presentes en tuberías de acero.,” 2010.
- [36] A.C. Moros Duran and E.Y. Torres Benites, “Aplicación de la técnica de ultrasonido para la estimación de la pérdida de espesor en la superficie externa de una pieza tubular,” 2009.
- [37] A.F. Muñoz Potosi, “Diseño e implementación de un dispositivo de exploración tridimensional del pie humano,” 2009.

- [38] D.M. Quintero Oliveros, R. Villamizar Mejía, and E.Y. Mendoza González, “Reconstrucción de defectos tridimensionales mediante proyección de franjas, en platinas metálicas con deformaciones mecánicas superficiales.,” 2010.