

**RECONSTRUCCIÓN DE DEFECTOS TRIDIMENSIONALES MEDIANTE
PROYECCIÓN DE FRANJAS, EN PLATINAS METÁLICAS CON
DEFORMACIONES MECÁNICAS SUPERFICIALES.**

DIANA MARGARITA QUINTERO OLIVEROS



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA
2010**



RECONSTRUCCIÓN DE DEFECTOS TRIDIMENSIONALES MEDIANTE
PROYECCIÓN DE FRANJAS, EN PLATINAS METÁLICAS CON
DEFORMACIONES MECÁNICAS SUPERFICIALES.

DIANA MARGARITA QUINTERO OLIVEROS

Trabajo de Grado en la Modalidad de Investigación para optar por el Título de
Ingeniera Electrónica

Director

PhD. RODOLFO VILLAMIZAR MEJÍA

Codirector

Ing. EDWARD YESITH MENDOZA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA

2010



***DEDICADO A MI MAMA Y
HERMANAS PORQUE ESTE
LOGRO ES TAMBIEN DE
ELLAS***

AGRADECIMIENTOS

- A la Profesora Luz Amparo Quintero por su ayuda incondicional y oportuna.
- Al Doctor Jaime Meneses por su aporte constante y desinteresado al desarrollo del conocimiento.
- Al Ingeniero Físico Daniel Gómez por su valiosa colaboración y asistencia durante el desarrollo del presente proyecto.
- Al Ingeniero Edward Yesith Mendoza por su incansable interés en el proyecto.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	1
III. SISTEMA DE RECONSTRUCCIÓN TRIDIMENSIONAL POR PROYECCIÓN DE FRANJAS	1
IV. CODIFICACIÓN DE LA ALTURA	2
V. CALCULO DE FASE	2
VI. MODELO EXPERIMENTAL	2
VII. AJUSTE DEL MODELO	3
A. <i>Calibración del Modelo</i>	3
1) <i>Desenvolvimiento de Fase Discontinua</i>	3
2) <i>Coefficientes de Calibración</i>	3
B. <i>Error entre la Fase Continua Obtenida y la Fase Ideal</i>	4
C. <i>Eliminación de Ruido</i>	4
D. <i>Factor de Relación entre Pixel y Milímetro</i>	5
VIII. RESULTADOS EXPERIMENTALES	5
A. <i>Resolución del Método Implementado</i>	5
B. <i>Reconstrucción de Platinas de Diferente Color y Textura</i>	7
1) <i>Platina de Acero a Bajo Carbono de Referencia A36, con Superficie Reflectiva</i>	7

2) <i>Platina de Acero a Bajo Carbono de Referencia A36, Preparada con Revelador</i>	7
a) <i>Dimensiones</i>	7
• <i>Rugosidad</i>	8
• <i>Profundidad máxima</i>	8
• <i>Diámetro</i>	8
• <i>Área</i>	8
3) <i>Platina de Acero a Bajo Carbono de Referencia A36, Preparada mediante Aplicación de Sandblasting</i>	9
a) <i>Dimensiones</i>	10
• <i>Rugosidad</i>	10
• <i>Profundidad máxima</i>	10
• <i>Área</i>	10
4) <i>Platina de Aluminio con Superficie Reflectiva</i>	10
a) <i>Dimensiones</i>	10
• <i>Profundidad máxima</i>	11
5) <i>Platina de Aluminio con Revelador</i>	11
C. <i>Proyección de Franjas de Color Diferente sobre la Misma Platina</i>	11
IX. <i>CONCLUSIONES</i>	12
X. <i>REFERENCIAS</i>	12
ANEXOS	14

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Fig. 1. Sistema de reconstrucción tridimensional por proyección de franjas.....	2
Fig. 2. Perfil de las franjas proyectadas sobre el plano de referencia.....	2
Fig. 3. Imágenes de intensidad con cambios sucesivos en fase dados por (1) y su respectivo perfil trazado sobre una fila sin defecto	2
Fig. 4. Modelo experimental implementado	3
Fig. 5. Fase continua del plano de referencia	3
Fig. 6. Perfil de la diferencia de fase entre cada plano y el plano de referencia	4
Fig. 7. Diferencia entre la fase obtenida y su regresión de grado 3 (fase ideal)	4
Fig. 8. Transformada de Fourier de la función de intensidad captada por la cámara	4
Fig. 9. Disminución del ruido por filtrado en frecuencia, a. antes del filtrado, b. después del filtrado	4
Fig. 10. Perfil de la función de intensidad. a. antes del filtrado, b. después del filtrado	5
Fig. 11. Aberraciones de la cámara	5
Fig. 12. Procedimiento de reconstrucción tridimensional	5
Fig. 13. Reconstrucción tridimensional del plano utilizado en el proceso de calibración, ubicado en $Z_0=0$ y un detalle de la misma	6
Fig. 14. Reconstrucciones de plano utilizado en la calibración, ubicado en diferentes coordenadas del eje Z_0	6
Fig. 15. Escalerilla de papel	6
Fig. 16. Reconstrucción tridimensional de la escalerilla de papel de la Fig. 15	6
Fig. 17. Perfil de la Fig. 16 en dirección de las filas	7

Fig. 18. Platina de Acero A36 con defectos causados mecánicamente, los defectos 1, 2, 3 y 5 fueron causados por golpes con balines y el defecto 4 fue realizado con una broca de un taladro convencional	7
Fig. 19. Reconstrucción de la platina de la figura 18, a partir de una fase con errores por zonas sin franjas	7
Fig. 20. Platina de la figura 18 preparada con revelador	7
Fig. 21. Reconstrucción de la platina de la figura 20. a. Perspectiva 1. b. Perspectiva 2	7
Fig. 22. Área en pixeles de cada defecto de la platina de la Fig. 20	9
Fig. 23. Platina sometida a sandblating	9
Fig. 24. Reconstrucción de la platina de la Fig. 23	9
Fig. 25. Platina sometida a sandblating y corrosión debido al medio ambiente del laboratorio	9
Fig. 26. Reconstrucción de la platina de la figura 25	10
Fig. 27. Platina de aluminio, los defectos 1-4 son provocados con indentadores y los defectos 5 y 6 son provocados mecánicamente	10
Fig. 28. Reconstrucción tridimensional de la platina de la Fig. 27	10
Fig. 29. Platina de la Fig. 27 preparada con revelador	11
Fig. 30. Reconstrucción tridimensional de la platina de la Fig. 29	11
Fig. 31. Perfil de la reconstrucción tridimensional de la platina de la Fig. 29	11
Fig. 32. a. Fondo negro franjas blancas, b. Fondo amarillo franjas rojas, c. Fondo blanco franjas rojas, d. Fondo amarillo franjas verdes, e. fondo verde franjas azules	11
Fig. 33. Reconstrucción tridimensional con franjas de diferente color. a. Fondo blanco franjas rojas. b. Fondo verde franjas azules	12

LISTA DE TABLAS

	Pág.
TABLA I. RUIDO EN EL MODELO IMPLEMENTADO	6
TABLA II. COMPARACIÓN CON OTROS MONTAJES IMPLEMENTADOS BASADOS EN PROYECCIÓN DE FRANJAS	6
TABLA III. PROFUNDIDAD PROMEDIO MÁXIMA DE LOS DEFECTOS NUMERADOS EN LA PLATINA DE LA FIG.20.....	8
TABLA IV. DIÁMETRO PROMEDIO DE LOS DEFECTOS NUMERADOS EN LA FIG. 20.....	8
TABLA V. ÁREA DE LOS DEFECTOS NUMERADOS EN LA FIG. 20.....	9
TABLA VI. PROFUNDIDAD PROMEDIO MÁXIMA DE LOS DEFECTOS NUMERADOS EN LA PLATINA DE LA FIG.25.....	10
TABLA VII. ÁREA DE LOS DEFECTOS NUMERADOS EN LA FIG. 25.....	10
TABLA VIII. PROFUNDIDAD PROMEDIO MÁXIMA DE LOS DEFECTOS NUMERADOS EN LA PLATINA DE LA FIG.27.....	11
TABLA IX. PROFUNDIDAD MÁXIMA DEL DEFECTO 4 DE LA PLATINA DE LA FIG. 20	12

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO 1. MODELO MATEMÁTICO DE LAS FRANJAS PROYECTADAS	14
ANEXO 2. MÉTODO DE CORRIMIENTO DE FASE	14

RESUMEN

TITULO: RECONSTRUCCIÓN DE DEFECTOS TRIDIMENSIONALES MEDIANTE PROYECCIÓN DE FRANJAS, EN PLATINAS METÁLICAS CON DEFORMACIONES MECÁNICAS SUPERFICIALES. *

AUTOR: Diana Margarita Quintero Oliveros **

PALABRAS CLAVES: Armónicos, Calibración, Corrimiento de Fase, Desenvolvimiento de fase, Fase continua, Intensidad, Método Óptico, Proyección de Franjas, Reconstrucción Tridimensional, Transformada de Fourier.

CONTENIDO: Este proyecto de investigación, se desarrolló como una primera etapa en el proceso de reconstrucción tridimensional de la superficie de tuberías metálicas corroídas por medio de técnicas no destructivas. En él se utilizó el método óptico de proyección de franjas y el método de corrimiento de fase, para reconstruir tridimensionalmente la superficie de platinas metálicas de diferente color y textura con defectos provocados mecánicamente. Se realizó a partir de esta reconstrucción, y mediante tratamiento de imágenes, la diferenciación de estos defectos, de la textura propia de la superficie, así como el dimensionamiento de la máxima profundidad, longitud y área de los mismos; estos resultados, se compararon con las medidas obtenidas utilizando elementos manuales mecánicos convencionales. Adicionalmente se realizaron proyecciones, cambiando el color de las franjas y se determinó así, cuales son las características adecuadas de esta proyección, para una correcta reconstrucción de la superficie en observación. En el modelo implementado, se utilizó como sistema de proyección, un video proyector convencional, y como sistema de observación, una cámara con interfaz USB, lo cual permitió la sincronización de la proyección de franjas y adquisición de imágenes por medio de algoritmos desarrollados en MATLAB. Con el modelo implementado se alcanzó una resolución de 50um para un campo de observación de 10x12 cm, lo que hace pertinente su uso en la extracción de parámetros para la evaluación de integridad de tuberías.

* Proyecto de Grado

** Facultad: Ingenierías Físico-mecánicas. Escuela: Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Director: Rodolfo Villamizar Mejía. Codirector: Edward Yesith Mendoza.

ABSTRACT

TITLE: THREE-DIMENSIONAL DEFECTS RECONSTRUCTION TROUGH FRINGES PROJECTION, IN METALLIC PLATES WITH SUPERFICIAL MECHANICAL DEFORMATION.*

AUTHOR: Diana Margarita Quintero Oliveros **

KEY WORDS: Harmonic, Calibration, Phase Shifting, Phase Unwrapping, Continuous Phase, Intensity, Optic Method, Fringe Projection, Three-Dimensional Reconstruction, Fourier Transform.

CONTENT: This investigation project was developed as a first stage in the process of the metallic corroded pipes' surface three-dimensional reconstruction by nondestructive techniques. In this project, it was used the fringes projection optic method and the phase shifting method, to three-dimensional reconstruct the surface of metallic plates of different color and texture with mechanically provoked defects. Starting from this reconstruction, and through images treatment, the differentiation between these defects and the surface texture was performed, as well as the maximum depth, length and area measurement of these; these results were compared to the measurements obtained using conventional mechanical manual elements. Additionally, projections were performed, changing the fringes' color and, in this way, it was determined what the appropriate characteristics of this projection are, to obtain a proper reconstruction of the observed surface. In the implemented model, a conventional video beam was used as the projection system, and a USB camera as the observation system; this allowed the fringe projection and the images acquisition synchronization through MATLAB developed algorithms. With the implemented model, it was reached a resolution of 50 um for a field of observation of 10x12 cm, which makes it pertinent to be used in the extraction of pipes' integrity evaluation parameters.

* Work Degree

**Faculty: Physical-Mechanical Engineering. School: Electrical, Electronic and Telecommunications Engineering. Director: Rodolfo Villamizar Mejía. Co-director: Edward Yesith Mendoza.

Reconstrucción de Defectos Tridimensionales mediante Proyección de Franjas, en Platinas Metálicas con Deformaciones Mecánicas Superficiales.

Diana Margarita Quintero Oliveros, Rodolfo Villamizar Mejía y Edward Yesith Mendoza

Resumen--En este proyecto se utilizó la técnica de proyección de franjas, para reconstruir la superficie de platinas metálicas de diferente color y textura con defectos provocados mecánicamente. Se realizó a partir de esta reconstrucción, el dimensionamiento de los defectos y mediante tratamiento de imágenes se logró su diferenciación, de la textura propia de la superficie. Adicionalmente se realizaron proyecciones, cambiando el color de las franjas y se definió así un criterio de elección del color apropiado para obtener una correcta reconstrucción.

Índice de Términos--Armónicos, Calibración, Corrimiento de Fase, Desenvolvimiento de fase, Fase continua, Intensidad, Método Óptico, Proyección de Franjas, Reconstrucción Tridimensional, Transformada de Fourier.

I. INTRODUCCIÓN

EN muchas áreas de la industria es indispensable monitorizar el cambio que sufre la superficie y/o el volumen de un cuerpo (equipo, dispositivo, elementos de conexión, etc.) debido a su interacción con agentes químicos y mecánicos entre otros. Sin embargo en algunas de estas áreas, esta monitorización se realiza manualmente, lo que conlleva a un gasto de mano de obra y tiempo, además de medidas imprecisas; factores que en términos de costo, generan pérdidas para las grandes industrias.

La reconstrucción tridimensional ofrece una forma más rápida y precisa de medida, puesto que proporciona información simultánea de alturas para todos los puntos de la superficie de un cuerpo observado, facilitando así su dimensionamiento.

En este trabajo se implementó el método óptico [1], [2],

Este trabajo fue realizado como proyecto de grado, en el Grupo de Investigación en Control, Electrónica, Modelado y Simulación (CEMOS) de la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones en la Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia; y contó con la colaboración de los Grupos de Investigación en Desarrollo y Tecnología de Nuevos Materiales (GIMAT) perteneciente a la Escuelas de Ingeniería Metalúrgica y el Grupo de Óptica y Tratamiento de Señales (GOTS) perteneciente a la escuela de Física.

D. M. Quintero es estudiante de Ingeniería Electrónica de la Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia (e-mail: electronicadiana@hotmail.com).

R. Villamizar PhD es profesor de la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad Industrial de Santander y es investigador miembro del grupo de investigación CEMOS. Bucaramanga, Colombia (e-mail: rovimam@uis.edu.co).

E. Y. Mendoza es Ingeniero Electrónico y estudiante de Maestría en Ingeniería Electrónica de la Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia (e-mail: mae3t3@uis.edu.co).

[3], [4] de proyección de franjas, para realizar la reconstrucción tridimensional de platinas metálicas de diferente color y textura, con deformaciones superficiales. Además se realizaron pruebas proyectando franjas de diferente color, para analizar su influencia en la reconstrucción.

II. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

En la industria del transporte de hidrocarburos, la ruptura de una tubería conlleva a pérdidas elevadas, tanto económicas, como sociales y ambientales, donde la corrosión es una de las causas más comunes. Existen herramientas automáticas (por ejemplo intelligent pigs [5]) que permiten localizar áreas de corrosión y estimar de manera aproximada el área corroída; sin embargo para el equipo encargado de la integridad de la tubería se requiere la mayor información posible de la misma (profundidad, área, volumen) para tomar decisiones de continuidad o parada. Por tanto esta investigación fue planteada debido a la necesidad de un método rápido, confiable, y de fácil uso para dicho dimensionamiento.

Actualmente el dimensionamiento es realizado en campo, por medio de elementos manuales de medida como relojes comparadores [6] y rugosímetros [7] en puntos localizados de la superficie de las tuberías, lo que genera altos tiempos de ejecución, mayor esfuerzo humano y subjetividad en la medida.

La solución planteada es entonces la reconstrucción tridimensional del área de la tubería corroída, utilizando técnicas no destructivas como lo son los métodos ópticos y entre ellos la técnica de proyección de franjas.

El reporte del presente artículo es la validación del método, en la reconstrucción y dimensionamiento de defectos en la superficie de platinas metálicas y su comparación con respecto a medidas realizadas con elementos manuales.

III. SISTEMA DE RECONSTRUCCIÓN TRIDIMENSIONAL POR PROYECCIÓN DE FRANJAS

El método de reconstrucción por proyección de franjas consta de un sistema de proyección, un sistema de observación y un plano de referencia, donde se focaliza el sistema de observación, ubicado en la coordenada $Z_0=0$ del sistema coordenado (X_0, Y_0, Z_0) como se observa en la Fig. 1.

El eje óptico de observación Z_c es perpendicular al plano de referencia [8] y entre este eje y el de proyección Z_p existe un ángulo α [1], [4], [9].

En la Fig. 1, se puede observar el modelo comúnmente

utilizado. Cuando se proyectan franjas sobre el plano de referencia, las franjas se ven paralelas entre sí, y debido al ángulo de proyección, las franjas en los extremos del plano de referencia se proyectan con menos nitidez que las del centro.

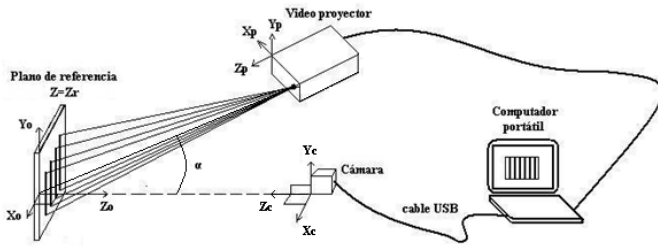


Fig. 1. Sistema de Reconstrucción Tridimensional por Proyección de Franjas.

Cuando se ubica un objeto sobre el plano de referencia, las franjas proyectadas se deforman dependiendo de la topografía del objeto y del ángulo α [10], y esta deformación respecto a la proyección de estas sobre el plano de referencia, es la variable óptica que codifica la altura del cuerpo.

IV. CODIFICACIÓN DE LA ALTURA

Cuando se tiene un sistema de proyección de franjas ideal, la imagen proyectada, tiene un perfil sinusoidal como se ve en la Fig. 2. Su forma de onda para una coordenada dada y_o , está descrita en el plano X_o vs. Z_o y tiene un periodo espacial P_o .

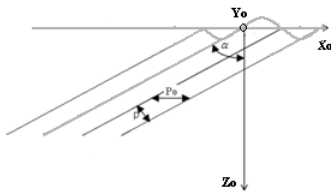


Fig. 2. Perfil de las franjas proyectadas sobre el plano de referencia. Adaptada de [2].

Sin embargo, la información que se procesa para realizar la reconstrucción, proviene de la función de intensidad captada por la cámara. Esta función varía de la función de transmitancia¹ proyectada, pero tiene también forma sinusoidal y su fase codifica la deformación de las franjas proyectadas sobre cualquier objeto teniendo en cuenta la no telecentricidad² del sistema óptico, el ángulo α entre los ejes de proyección y observación y la influencia de las aberraciones geométricas [8].

Al ubicar el objeto a reconstruir, sobre el plano de referencia con una fase inicial Φ_o , las franjas sufren una deformación en dirección del eje X_o , que se ve reflejado en un cambio en la fase de la función de intensidad captada, ver Anexo 1. Por lo tanto, cada cambio en la altura del punto de coordenadas (x_o, y_o) del objeto observado, se manifiesta como un cambio $\Delta\Phi(x_o, y_o)$ en su fase $\Phi(x_o, y_o)$. Así la altura de

¹ Índice entre la luz proyectada y la luz transmitida [11].

² un sistema *no telecéntrico* es aquel en el cual las dimensiones de la imagen, cambian al cambiar la distancia de observación [12].

cada punto del objeto, esta codificada en su fase, y si se logra extraer esta fase, se puede recuperar su altura [13].

Por lo anteriormente descrito, se podría hallar una relación geométrica [1] entre la diferencia de fase y la altura; pero puesto que el sistema utilizado en este trabajo es un sistema no telecéntrico, la relación que existe entre la altura de un punto y su fase, depende de parámetros como el paso de proyección, el ángulo entre los ejes de proyección y observación y el factor de ampliación del sistema de observación entre otros y por lo tanto una relación geométrica, estaría sujeta al error en el cálculo de estos parámetros.

V. CALCULO DE FASE

La fase de un sistema de franjas, se puede obtener por diversos métodos utilizando imágenes de intensidad de las franjas proyectadas; entre ellos se encuentran el método de la transformada de Fourier [2], [14] y el método de corrimiento de fase [1], [4].

En este trabajo se optó por el método de corrimiento de fase puesto que permite obtener la fase de cada punto sin que los puntos vecinos influyan en el cálculo de la misma [8]; esto es de gran utilidad, en el caso de imágenes de objetos con zonas sin franjas por causa de discontinuidades o ruido.

Para el cálculo de la fase, en el presente trabajo, se desarrolló un algoritmo donde se toman 4 imágenes de intensidad I_i como se muestra en la Fig. 3 con cambios sucesivos Φ_i en la fase, dados por (1), donde $N=4$.

$$\Phi_i = \left(\frac{2\pi}{N}\right)(i-1) \quad i=1, 2, 3, \dots, N \quad (1)$$

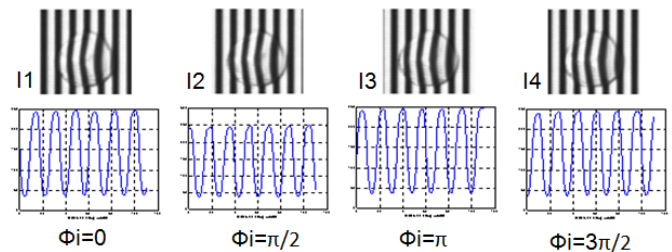


Fig. 3. Imágenes de intensidad con cambios sucesivos en fase dados por (1) y su respectivo perfil trazado sobre una fila sin defecto.

Debido a que los corrimientos de fase se hicieron hacia la derecha, se obtiene (2) como se explica en el Anexo 2. De (2) y con las 4 imágenes obtenidas, se halla la fase discontinua Φ [10].

$$\tan(\Phi) = \frac{I_4 - I_2}{I_3 - I_1} \quad (2)$$

VI. MODELO EXPERIMENTAL

Esta investigación fue realizada a nivel de laboratorio, y el montaje utilizado para su desarrollo se puede observar en la Fig. 4, cuya configuración, sigue el modelo descrito en la Fig. 1. Este montaje permite realizar automáticamente la proyección de franjas con sus respectivos corrimientos en fase y la captura de imágenes de las mismas. En este caso, la proyección se realiza sobre el plano de referencia, el cual se

encuentra montado sobre un sistema de desplazamiento micrométrico.



Fig. 4. Modelo experimental implementado.

Como se puede observar en la Fig. 4, para la proyección de las franjas se utiliza un video proyector convencional de luz blanca³ con tecnología DLP⁴.

El sistema de observación está conformado por una cámara uEye EO 1312C USB2.0 v3.2 de IDS (Imaging Development Systems) con tecnología CMOS, con resolución de 1280x1024 pixeles; conectada por medio de un cable USB 2.0 a un computador portátil con sistema operativo Windows vista de 32 bits. La proyección y captura automática de las imágenes se realizó por medio de algoritmos desarrollados en Matlab [17], [18], [19].

En la cámara se utilizó un lente de diafragma manual de 16 mm de longitud focal⁵ con apertura⁶ máxima de 1:1.4, con montura C y campo de visión angular: 2/3": 30.8° × 23.3°.

Las distancias entre los elementos del modelo de la Fig. 4, son: 61 cm entre el lente del proyector y el plano de referencia, 32.5 cm entre el lente de la cámara y el plano de referencia. El ángulo α entre el eje de proyección y el eje óptico es de 31.6°. Esto con el fin de obtener un campo de observación de aproximadamente 12x10 cm².

VII. AJUSTE DEL MODELO

Para la reconstrucción tridimensional de objetos con este modelo, se realizó una calibración de alturas en el espacio de trabajo respecto al plano de referencia, obteniéndose su relación con el cambio de fase respecto al mismo. Posteriormente se ubicó el objeto a reconstruir, dentro de este campo calibrado, para hallar su fase y por medio de la diferencia entre las fases del objeto y del plano de referencia se obtuvo la reconstrucción en 3D del mismo.

³ Término usado para describir la baja coherencia natural de las fuentes de luz [2].

⁴ Basada en la tecnología DMD (Digital Micromirror Device) [16].

⁵ Distancia desde el centro óptico de la lente al plano en el cual la imagen se forma más intensamente cuando la lente se enfoca en un objeto distante. Longitudes más cortas, imágenes más pequeñas pero más campo de visión [20].

⁶ La apertura afecta la exposición y la profundidad del campo visual (rango en frente y detrás del enfoque objeto) que a su vez depende de la longitud focal de la lente [20].

A. Calibración del Modelo

Esta etapa de calibración del modelo, permite obtener una ecuación experimental de conversión de fase en altura que tiene en cuenta todos los parámetros intrínsecos del modelo.

Para realizar esta calibración se desplazó un plano ubicado inicialmente en las coordenadas del plano de referencia ($Z_0=0$), en dirección positiva y negativa del eje Z_0 (de -2 cm a 2 cm) a intervalos de 500um y para cada desplazamiento se obtuvo su fase utilizando el método de corrimiento de fase mencionado en la sección V.

1) *Desenvolvimiento de Fase Discontinua*: Debido al uso de la función inversa arctan cuyo rango toma valores de $-\pi$ a π , se obtiene una función de fase para cada plano, que presenta discontinuidades de 2π .

Puesto que a cada punto del objeto le debe corresponder una fase diferente, respecto a un punto de referencia dado, que codifique su altura, es necesario eliminar estas discontinuidades para obtener la función fase continua.

Con este fin, se aplicó el algoritmo clásico [10] de desenvolvimiento de fase [4] "unwrapping" desarrollado con base en la función unwrap en Matlab que opera, volviendo continua la fase en radianes sumando o restando múltiplos de 2π cuando los saltos entre elementos consecutivos son mayores a π [15], obteniéndose así una matriz de fase continua cuya gráfica global es aproximadamente un plano inclinado como el que se muestra en la Fig. 5.

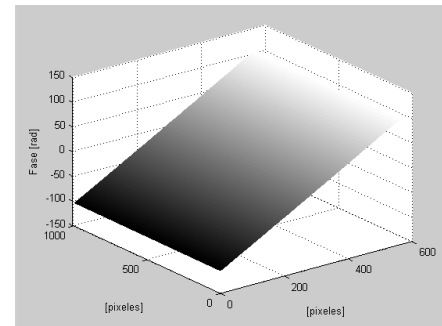


Fig. 5. Fase continua del plano de referencia.

Este algoritmo es una buena opción cuando el ruido en la detección de las franjas proyectadas es bajo, el contraste en las imágenes es alto, y el objeto no presenta discontinuidades que generen sombras cuando las franjas son proyectadas sobre él. De este modo las discontinuidades en la fase se deberán solo a la función arctan.

Al observar la fase en cada desplazamiento, se puede ver que su fase respecto al plano de referencia aumenta o disminuye según la dirección, hasta llegar a $\pm\pi$ y se repite así sucesivamente para los siguientes desplazamientos. Por lo anterior se procedió a obtener la fase continua entre planos utilizando una variante del algoritmo clásico de desdoblamiento descrito anteriormente.

2) *Coefficientes de Calibración*: Posteriormente, se halló el cambio de fase de cada plano respecto a la del plano de referencia, obteniendo superficies parabólicas. En la Fig. 6 se observa un perfil de estas superficies parabólicas.

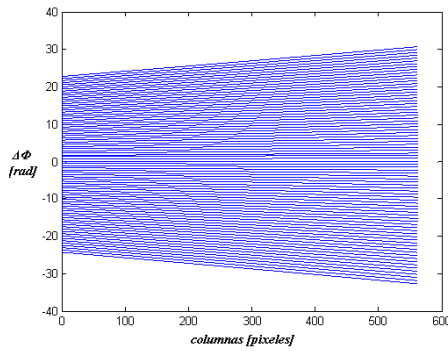


Fig. 6. Perfil de la diferencia de fase entre cada plano y el plano de referencia.

Puesto que solo se buscó diferencias de fase para desplazamientos discretos (500um), es necesario obtener una función por medio de interpolación para poder reconstruir toda la superficie del objeto. Se ajustó entonces a los datos de $\Delta\Phi$ obtenidos en la calibración para un punto del plano, un polinomio cuadrático que relaciona el cambio de fase con la altura, este polinomio cuadrático se define en (3).

$$\Delta\Phi(x_o, y_o) = \Phi(x_o, y_o) - \Phi_o(x_o, y_o) = a(x_o, y_o)Z^2 + b(x_o, y_o)Z + c(x_o, y_o) \quad (3)$$

A partir de (3) se calculan las matrices de coeficientes a, b, c [10], con las cuales si se obtiene $\Delta\Phi$ para un objeto, se puede obtener su altura correspondiente Z.

B. Error entre la Fase Continua Obtenida y la Fase Ideal

Cuando el plano de referencia no es perfecto o hay ruido en el sistema, existen en la fase calculada, discontinuidades menores de 2π que no se deben a la función arctan. Muchas de estas discontinuidades pueden ser menores a π y no serán eliminadas por el algoritmo de desdoblamiento ocasionando un rizado residual en la fase continua.

Por lo tanto para asegurar que la fase continua esté libre de ruido, es conveniente realizar una regresión bidimensional que se ajuste solo a la forma global de la fase continua obtenida para así eliminar este rizado.

Con este fin se realizaron regresiones de grado 1, 2, 3 y se concluyó que la de grado 3 se ajusta mejor a la forma global de la fase obtenida. La diferencia entre la fase obtenida y su regresión, se puede ver en la Fig. 7.

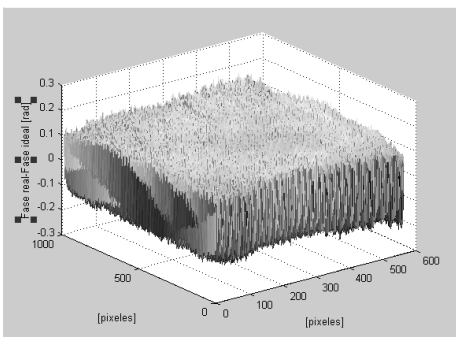


Fig. 7. Diferencia entre la fase obtenida y su regresión de grado 3 (fase ideal).

En la Fig. 7, se hace evidente una diferencia de fase de

± 0.15 rad, lo cual representaría imperfecciones del plano de referencia o ruido del sistema, el cual debe ser eliminado para lograr una buena reconstrucción del objeto.

C. Eliminación de Ruido

El ruido en el sistema puede tener muchas fuentes, pero principalmente la mencionada diferencia entre la fase ideal y la obtenida se debe al patrón de franjas proyectado. El procedimiento descrito para extraer la fase utiliza un patrón de franjas de perfil sinusoidal, pero el perfil del patrón de franjas proyectado presenta un perfil de onda cuadrada [10], debido a que se creó un algoritmo que proyecta franjas negras y blancas de dos píxeles de grosor.

La transformada de Fourier de la función de intensidad captada por la cámara, se observa en la Fig. 8 en la que se puede apreciar una componente constante en la frecuencia cero, dos componentes simétricas en la frecuencia fundamental y algunos armónicos a frecuencias más altas disminuyendo sucesivamente en amplitud.

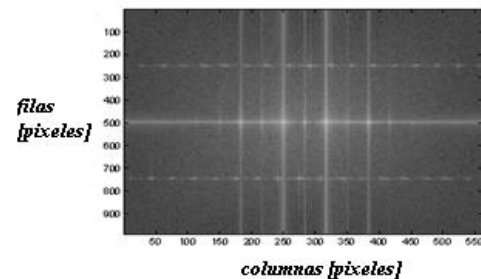


Fig. 8. Transformada de Fourier de la función de intensidad captada por la cámara.

Puesto que una onda sinusoidal solo tiene componentes en la frecuencia fundamental, los armónicos en frecuencias mayores a esta, serán fuente de error al extraer la fase del sistema y contribuirán al ruido de la Fig. 7.

Para eliminar este ruido se deben eliminar estos armónicos y esto se puede lograr filtrando en el dominio de la frecuencia las imágenes adquiridas.

En este proyecto se aplicó un filtro que deja pasar solamente el primer armónico eliminando los armónicos mayores, logrando obtener una función de intensidad más sinusoidal. En la Fig. 9, se observa el ruido en la fase antes (Fig.9a) y después de eliminar los armónicos indeseados (Fig.9b).

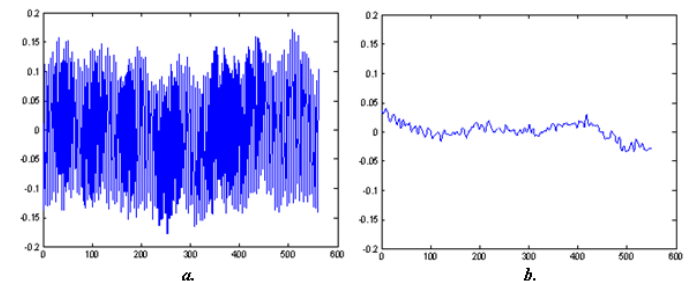


Fig. 9. Disminución del ruido por filtrado en frecuencia, a. antes del filtrado, b. después del filtrado.

En la Fig. 10 se observa el efecto del filtrado en la imagen de intensidad de las franjas así como en su perfil trazado en dirección de las filas.

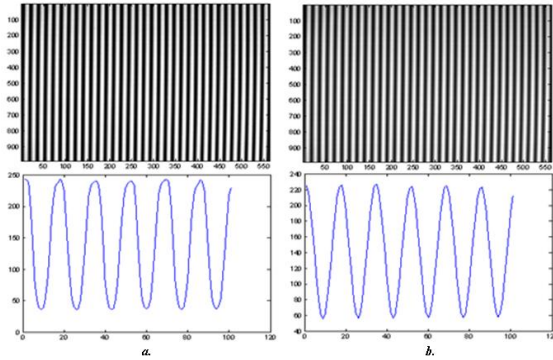


Fig. 10. Perfil de la función de intensidad. a. antes del filtrado, b. después del filtrado.

D. Factor de Relación entre Pixel y Milímetro

Puesto que la imagen capturada por la cámara esta en pixeles la reconstrucción obtenida estará en pixeles. Por lo tanto, para obtener una reconstrucción tridimensional real se debe obtener un factor de conversión de pixeles a unidades reales. Este valor depende del factor de amplificación de la cámara y de las aberraciones del lente utilizado. Si estas aberraciones afectan notablemente las medidas, debe llevarse a cabo una calibración de la cámara para obtener sus parámetros intrínsecos y los factores de corrección, que permitan la conversión de unidades [17].

En la Fig. 11 se muestra la imagen capturada por la cámara, de una cuadrícula impresa de cuadrados de $1 \times 1 \text{ cm}^2$, sobre la cual se trazan líneas rectas de un pixel de grosor.

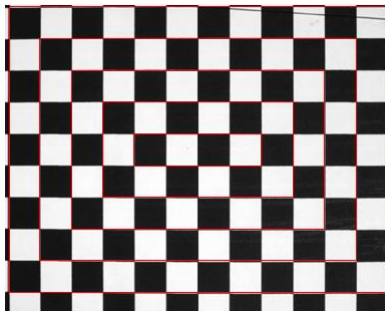


Fig. 11. Aberraciones de la cámara.

Se puede observar que la influencia de las aberraciones es mínima y está en el orden de los micrómetros, lo cual no es relevante en esta aplicación puesto que las dimensiones a medir están en el rango de los milímetros y por lo tanto puede obtenerse un factor lineal de conversión de pixeles a milímetros, dentro de este campo de observación.

Con este fin se realizó, sobre la cuadrícula de la Fig. 11, la medida longitudinal del número de pixeles que hay en dos cuadrados, se obtuvo que una longitud de 2 cm es equivalente a 213 pixeles. Así un milímetro tendrá 10.65 pixeles y con

este factor de conversión se pueden obtener medidas en milímetros de las figuras en pixeles.

VIII. RESULTADOS EXPERIMENTALES

EL método descrito ha sido ampliamente utilizado para reconstruir objetos de diferentes características, y en este trabajo se adaptó para reconstruir platinas metálicas de diferentes colores y texturas.

El procedimiento de reconstrucción se llevó a cabo como se muestra en el diagrama de flujo de la Fig. 12.

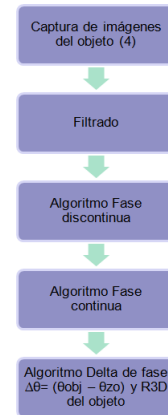


Fig. 12. Procedimiento de reconstrucción tridimensional.

Una vez obtenida la fase continua del objeto como se muestra en la Fig. 12, se puede obtener la diferencia de fase entre el objeto y el plano de referencia. Conociendo esta cantidad $\Delta\Phi$ y los coeficiente a, b, c para cada punto del plano obtenidos en la calibración, se aplica (3) para obtener la altura de cada punto del cuerpo y por lo tanto su reconstrucción tridimensional.

Inicialmente se realizaron pruebas sobre el plano de referencia y sobre una escalerilla de papel adherida al plano de referencia, para cuantificar la resolución del método.

Posteriormente se procedió a aplicarlo sobre platinas de acero a bajo carbono de referencia A36, y platinas de aluminio. Se comparó el dimensionamiento realizado a partir de la reconstrucción tridimensional, con las medidas obtenidas utilizando elementos manuales mecánicos convencionales. Además se proyectaron franjas de diferente color sobre una misma platina para evaluar su efecto en la reconstrucción.

A. Resolución del Método Implementado

Con el fin de conocer la resolución del método se realizó la reconstrucción del plano utilizado en el proceso de calibración, ubicado en la coordenada $Z_0=0$. En la Fig. 13 se muestra la reconstrucción de este plano y un detalle de la misma.

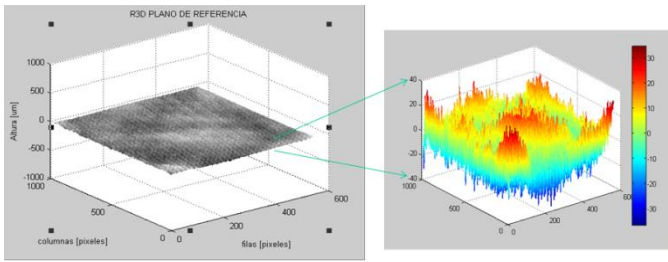


Fig. 13. Reconstrucción tridimensional del plano utilizado en el proceso de calibración, ubicado en $Z_0=0$ y un detalle de la misma.

La desviación de esta reconstrucción, respecto a un plano ideal, se debe al ruido del sistema que no fue eliminado en el filtrado y a la no uniformidad de la cubierta del mismo, debido a que el plano utilizado es un vidrio cubierto con una capa de pintura de color blanco mate, aplicada en aerosol manualmente.

Al realizar el mismo procedimiento para diferentes ubicaciones del plano como se observa en la Fig. 14, se encuentra que la amplitud máxima del ruido no varía significativamente.

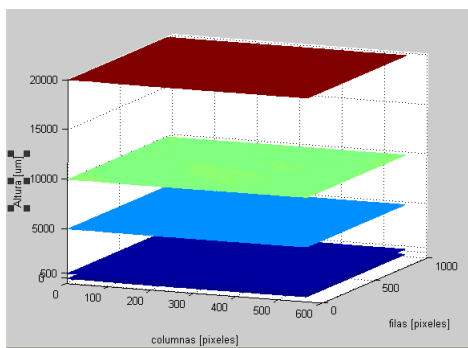


Fig. 14. Reconstrucciones de plano utilizado en la calibración, ubicado en diferentes coordenadas del eje Z_0 .

En la tabla I se muestra la desviación estándar y la amplitud máxima del ruido para cada una de las reconstrucciones observadas en la Fig. 14, así como el valor medio del desplazamiento obtenido.

TABLA I
RUIDO EN EL MODELO IMPLEMENTADO

DESPLAZAMIENTO [um]	Valor medio del desplazamiento obtenido[um]	Amplitud Máxima pico a pico del ruido[um]	Desviación estándar del ruido [um]
-500	-496.26	45.04	6.03
500	528.72	46.18	6.61
5000	5009.60	47.10	6.65
10000	1000.30	48.87	6.75
20000	20015.00	47.78	6.71

Puesto que la resolución del modelo implementado estará dada por la mínima altura que pueda definir, se concluye que el modelo implementado resuelve objetos con alturas mayores o iguales a 50 um.

En la bibliografía se pueden encontrar resoluciones mayores en aplicaciones diferentes del montaje experimental como se observa en la tabla II. El montaje 1 [10] es similar al implementado en esta investigación y en el montaje 2 [1] la proyección fue realizada con una rejilla de difracción que permite mayor resolución pero un área de trabajo más pequeña.

TABLA II
COMPARACIÓN CON OTROS MONTAJES IMPLEMENTADOS BASADOS EN PROYECCIÓN DE FRANJAS

MONTAJE	AUTOR	ÁREA DE OBSERVACIÓN	RESOLUCIÓN
1	D.GÓMEZ	12x9cm ²	20um
2	Z. PÉREZ Y L.ROMERO	4x3mm ²	10um
3	MONTAJE IMPLEMENTADO	12x10cm ²	50um

Para corroborar la resolución del método, se realizó la reconstrucción de una escalerilla de papel de un grosor aproximado de 100um, adherida sobre un plano como se observa en la Fig. 15.

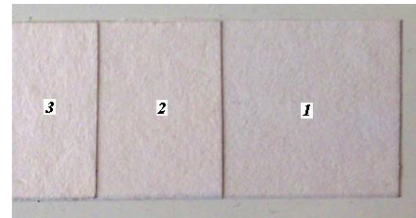


Fig.15. Escalerilla de papel.

Ya que la ubicación de los objetos a reconstruir se realiza manualmente, pueden presentar inclinación en el momento de la prueba. Esta inclinación se ha eliminado obteniendo la diferencia entre la reconstrucción y su regresión bidimensional de primer grado (mejor plano). Por esta razón, el error en la medida puede estar influenciado por esta aproximación.

La reconstrucción de la escalerilla de la Fig. 15 se observa en la Fig. 16.

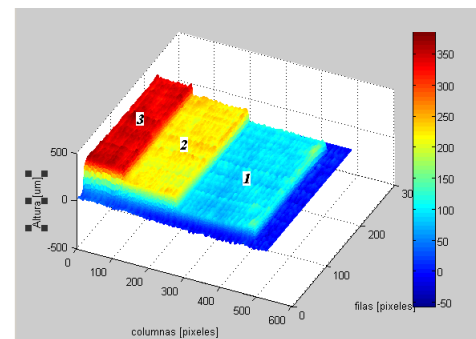


Fig. 16. Reconstrucción tridimensional de la escalerilla de papel de la Fig. 15.

En la Fig. 17 se muestra el perfil de cada escalón en dirección de las filas, en donde se puede observar la altura de cada nivel

y se reafirma la resolución del método.

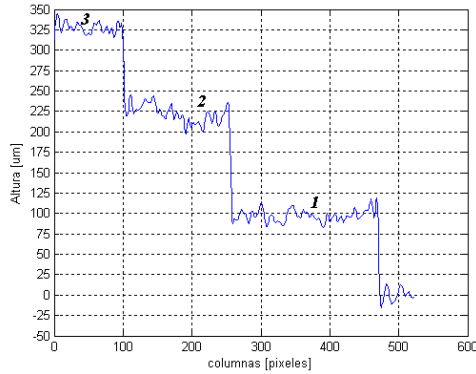


Fig. 17. Perfil de la Fig. 16 en dirección de las filas.

B. Reconstrucción de Platinas de Diferente Color y Textura

1) *Platina de Acero a Bajo Carbono de Referencia A36, con Superficie Reflectiva:* Se aplicó el método sobre la platina de acero A36, mostrada en la Fig. 18, que inicialmente fue rectificada y pulida hasta lija 300, para luego realizarle deformaciones mecánicamente.



Fig. 18. Platina de Acero A36 con defectos causados mecánicamente, los defectos 1, 2, 3 y 5 fueron causados por golpes con balines y el defecto 4 fue realizado con una broca de un taladro convencional.

Algunas superficies metálicas como esta, comúnmente tienen una fuerte reflexión que ocurre por la distribución no uniforme de la intensidad de la luz reflejada. Hay áreas con una muy fuerte intensidad de luz y otras con muy baja intensidad [21]. Este fenómeno hace que al proyectar franjas sobre el cuerpo, haya zonas en la imagen de intensidad, donde no aparecen franjas, como en el caso de esta platina. Por lo tanto el cálculo de fase en ellas será erróneo, y debido al algoritmo de desenvolvimiento utilizado, este error se propagará al resto de la superficie y la reconstrucción tridimensional del cuerpo será inexacta como la que se observa en la Fig. 19 donde se aprecian desviaciones de la pieza real.

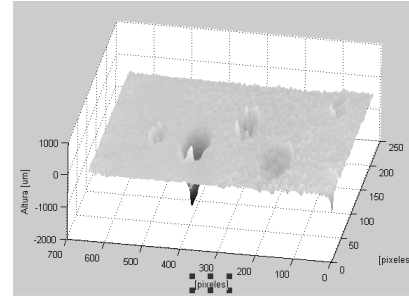


Fig. 19. Reconstrucción de la platina de la figura 18, a partir de una fase con errores por zonas sin franjas.

Estos errores de fase se pueden evitar si se obtiene una reflexión relativamente uniforme mediante una preparación de la pieza [13] o la manipulación de la iluminación para acentuar las características deseadas [22].

2) *Platina de Acero a Bajo Carbono de Referencia A36, Preparada con Revelador:* Para obtener buena definición en las franjas y asegurar su continuidad, se aplicó previamente sobre la platina de la Fig. 18, un revelador con base disolvente marca Magnaflux, comúnmente aplicado en laboratorios de ensayos no destructivos, que deja una fina capa blanca sobre la pieza como se observa en la Fig. 20.

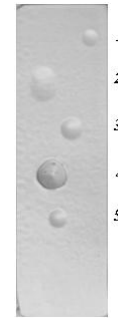


Fig. 20. Platina de la figura 18 preparada con revelador.

Se realizó así, nuevamente su reconstrucción como se puede apreciar en Fig. 21 donde se muestran dos perspectivas de la misma.

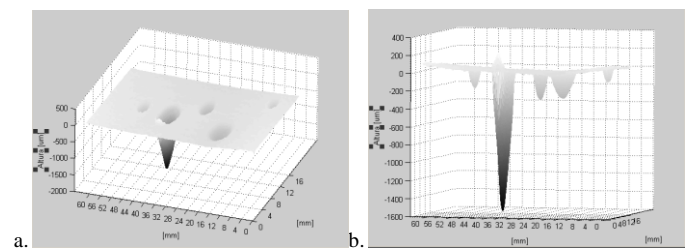


Fig. 21. Reconstrucción de la platina de la figura 20. a. Perspectiva 1. b. Perspectiva 2.

De la figura 21 se observa que la preparación de la platina, mejoró efectivamente la calidad de la reconstrucción y por lo tanto se procedió a realizar su dimensionamiento.

a) *Dimensiones:* Las dimensiones de los defectos, obtenidas a partir de la reconstrucción de la platina de la Fig.

20 se muestran en las tablas III, IV y V, junto con las medidas realizadas con un pie de rey digital y con un reloj comparador.

•**Rugosidad:** La rugosidad obtenida con el reloj comparador (0.02mm) es menor a la resolución del sistema y por lo tanto está influenciada por el ruido del mismo mostrado en la sección VIII. A. Por esta razón la medida de esta rugosidad no es un dato confiable con el método de reconstrucción implementado.

•**Profundidad máxima:** Para realizar la medida de profundidad de los defectos, se tomo la zona de la reconstrucción que contiene al defecto y por medio de un algoritmo se detectaron las coordenadas de su profundidad máxima. Para cada uno de los defectos, se extrajo el perfil en dirección de las filas y de las columnas en dichas coordenadas y se obtuvo su valor promedio. Los resultados se muestran en la tabla III.

TABLA III
PROFUNDIDAD PROMEDIO MÁXIMA DE LOS DEFECTOS NUMERADOS EN LA PLATINA DE LA FIG.20

NUMERO DE DEFECTO	DISPOSITIVO DE MEDIDA				%ERROR
	PIE DE REY DIGITAL (resolución 0.01mm) [mm]	RECONSTRUCCIÓN POR PROYECCIÓN DE FRANJAS [mm]			
		Perfil en dirección de las filas	Perfil en dirección de las columnas	Promedio	
1	0.15	0.17	0.16	0.17	13.33
2	0.25	0.28	0.27	0.28	12.00
3	0.30	0.30	0.32	0.31	3.33
4	1.40	1.55	1.57	1.56	11.43
5	0.20	0.21	0.22	0.22	10.00

Se debe tener en cuenta que el pie de rey no penetra hasta la máxima profundidad de algunos defectos y que los errores de medida son del orden de las decenas de micrómetros.

•**Diámetro:** Puesto que los defectos no tienen una forma completamente circular, se muestra en la tabla V un promedio de varias medidas del diámetro de cada defecto, tomados con los elementos manuales; así como el promedio del diámetro en dirección de las filas y de las columnas hallado con la reconstrucción. Estos últimos se obtuvieron con la ayuda de la herramienta *imtool* de Matlab, que tiene la capacidad de medir distancias en pixeles directamente sobre una imagen.

Esta herramienta permite modificar el contraste de una imagen a partir de la manipulación de su histograma, lo que facilita el dimensionamiento de diámetros.

En la tabla IV, las unidades ya han sido convertidas a milímetros multiplicando por el factor 20/213 reportado anteriormente.

TABLA IV
DIÁMETRO PROMEDIO DE LOS DEFECTOS NUMERADOS EN LA FIG. 20

NUMERO DE DEFECTO	DISPOSITIVO DE MEDIDA				%ERROR
	PIE DE REY DIGITAL (resolución 0.01mm) [mm]	RECONSTRUCCIÓN POR PROYECCIÓN DE FRANJAS [mm]			
		Perfil en dirección de las filas	Perfil en dirección de las columnas	Promedio	
1	2.80	2.96	3.00	2.98	6.43
2	6.80	5.78	7.23	6.51	4.26
3	4.10	4.55	4.69	4.62	12.68
4	6.50	6.99	6.95	6.97	7.23
5	3.40	3.15	3.38	3.27	3.82

Cuando se analiza una reconstrucción como una imagen, los niveles de altura se ven traducidos a niveles de gris. Si la platina tiene depresiones, estas se verán más oscuras que el resto de la superficie. Puesto que estos defectos fueron causados de manera no controlada, sus bordes no están bien definidos y la medida de su diámetro mediante la herramienta mencionada dependerá de un buen ajuste de contraste para cada defecto independientemente de los otros.

En este caso por tratarse de una platina rectificada, un ajuste general de contraste definió aproximadamente todos los defectos y por lo tanto no se realizó por zonas, por lo cual algunos de los diámetros hallados resultaron más exactos que otros.

•**Área:** Para cuantificar las áreas de los defectos a nivel de la superficie de la platina, se desarrolló un algoritmo en MATLAB que permite al usuario elegir un punto directamente sobre la imagen, del cual se toma su nivel de gris para usarlo como umbral en la binarización. Esta imagen binarizada da al usuario un criterio para cambiar o no el umbral dependiendo de las áreas que desea dejar pasar. El umbral puede ser modificado tantas veces como se desee. Para garantizar que todos los defectos quedaran definidos después de la binarización, se eligió como punto umbral el borde del defecto número 1 que es el defecto más claro. La imagen obtenida se somete a un proceso de filtrado para definir la forma de los defectos y así se procede a hallar las áreas en pixeles de cada uno de ellos y ubicarlas automáticamente sobre el respectivo defecto. El resultado final del algoritmo se muestra en la Fig. 22.



Fig. 22. Área en pixeles de cada defecto de la platina de la Fig. 20.

Para obtener el área en mm basta con multiplicar el área hallada en pixeles por el área de un pixel en milímetros que en este caso es de $8.8 \times 10^{-3} \text{mm}^2$.

En la tabla V se realiza una comparación con las medidas obtenidas con los elementos manuales utilizando los diámetros obtenidos con el pie de rey digital y aproximando la forma de los defectos a una circunferencia.

TABLA V
ÁREA DE LOS DEFECTOS NUMERADOS EN LA FIG. 20

NUMERO DE DEFECTO	DISPOSITIVO DE MEDIDA		%ERROR
	AREA TEORICA Πr^2 (hallada con el radio promedio) $[\text{mm}^2]$	RECONSTRUCCIÓN POR PROYECCIÓN DE FRANJAS (Algoritmo para hallar áreas) $[\text{mm}^2]$	
1	6.16	4.73	23.21
2	36.30	32.99	9.12
3	13.20	16.00	21.21
4	33.20	37.18	11.99
5	9.08	8.00	11.89

Como se observa hay errores del orden del 20% y esto se debe en primera medida a la forma como se obtuvo el área teórica así como al umbral seleccionado en el algoritmo desarrollado, el cual no define de igual forma todos los defectos.

3) *Platina de Acero a Bajo Carbono de Referencia A36, Preparada mediante Aplicación de Sandblasting:* Sandblasting es una técnica de limpieza para superficies, comúnmente utilizada en la industria petroquímica, que aplica arena a muy altas presiones [23]. En este caso se aplicó sandblasting a 150 lb por pulgada cuadrada durante 5 min a una platina de acero A36 sin rectificar. Este procedimiento le dio un color gris opaco, como se muestra en la Fig. 23.



Fig. 23. Platina sometida a sandblasting.

Se realizó su reconstrucción y se puede observar en la Fig. 24.

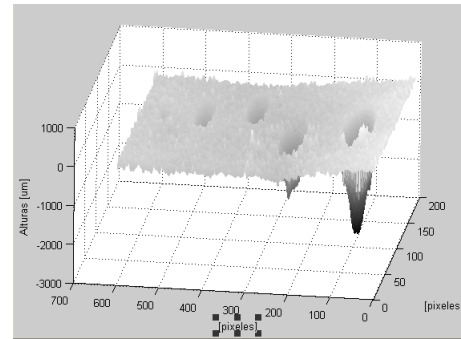


Fig. 24. Reconstrucción de la platina de la Fig. 23.

Esta platina por efecto de la manipulación y el medio ambiente, presentó corrosión y obtuvo la apariencia de la Fig. 25.

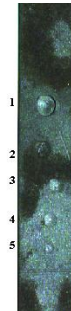


Fig. 25. Platina sometida a sandblasting y corrosión debido al medio ambiente del laboratorio.

Ya que las conclusiones de este trabajo son un aporte para la reconstrucción de superficie de tuberías corroídas, se aplicó el método sobre la platina de la Fig. 25 con el fin de analizar sus resultados y se obtuvo su reconstrucción, mostrada en la Fig. 26, en la cual se puede observar la diferencia entre las zonas corroídas y el resto de la superficie mediante los niveles de gris.

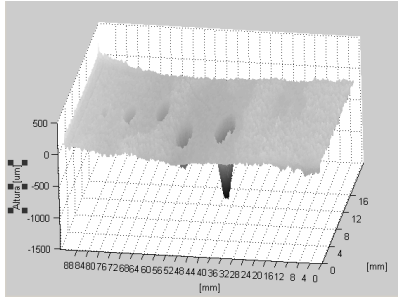


Fig. 26. Reconstrucción de la platina de la figura 25.

Con esta reconstrucción se realizó su dimensionamiento como se observa en las tablas VI y VII.

a) *Dimensiones:* Al igual que en la platina anterior las dimensiones obtenidas con el método se comparan con las obtenidas con el reloj comparador y el pie de rey digital.

• *Rugosidad:* La rugosidad obtenida con el reloj comparador es de 0.03mm en la zona sin corrosión y de 0.05 en la zona corroída.

• *Profundidad máxima:*

TABLA VI

PROFUNDIDAD PROMEDIO MÁXIMA DE LOS DEFECTOS NUMERADOS EN LA PLATINA DE LA FIG.25

NUMERO DE DEFECTO	DISPOSITIVO DE MEDIDA					%ERROR CON PIE DE REY	%ERROR CON RELOJ COMPARADOR
	PIE DE REY DIGITAL (resolución 0.01mm) [mm]	RELOJ COMPARADOR (resolución 0.01mm) [mm]	RECONSTRUCCIÓN POR PROYECCIÓN DE FRANJAS [mm]				
			Perfil en dirección de las filas	Perfil en dirección de las columnas	Promedio		
1	1.10	1.14	1.13	1.11	1.12	1.80	1.75
2	0.45	0.55	0.54	0.52	0.53	17.80	3.64
3	0.26	0.35	0.35	0.31	0.33	26.90	5.71
4	0.20	0.27	0.31	0.32	0.32	60.00	18.52
5	0.06	0.12	0.15	0.15	0.15	150.00	25.00

Como se puede observar hay errores grandes de medida respecto a la profundidad teórica. Esto se debe a la dificultad de medir la profundidad real del defecto con los elementos manuales debido a su alta rugosidad y a que esta platina no fue rectificada.

• *Área:*

TABLA VII

ÁREA DE LOS DEFECTOS NUMERADOS EN LA FIG. 25

NUMERO DE DEFECTO		1	2	3	4	5
DISPOSITIVO DE MEDIDA	RECONSTRUCCIÓN POR PROYECCIÓN DE FRANJAS (Algoritmo para hallar áreas)	29.40	5.38	1.60	10.58	2.50

En este caso fue necesario utilizar el algoritmo para hallar áreas, en cada defecto por separado puesto que como se mencionó, la platina no fue rectificada y así los niveles de gris de los defectos son muy diferentes. Por lo tanto al dejar pasar uno, se eliminan los otros.

4) *Platina de Aluminio:* Con el fin de visualizar la efectividad en la reconstrucción de pequeños defectos se reconstruyó la platina de la Fig. 27, sobre la cual se realizaron deformaciones con dimensiones menores a 100um causadas con indentadores utilizados en pruebas de dureza superficial.



Fig. 27. Platina de aluminio, los defectos 1-4 son provocados con indentadores y los defectos 5 y 6 son provocados mecánicamente.

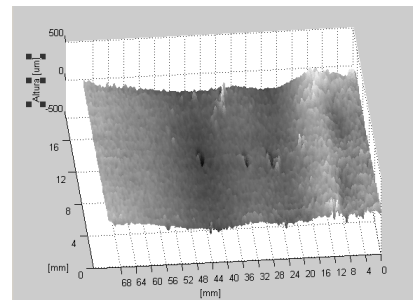


Fig. 28. Reconstrucción tridimensional de la platina de la Fig. 27.

En la Fig. 28 se observa que en la reconstrucción la definición de los defectos no es muy precisa pero aún así, se logra su diferenciación de la topología propia de la platina. Las ondulaciones de la misma mostradas en la reconstrucción son casi imperceptibles en la muestra real pero el método las hace visibles.

a) *Dimensiones:* El dimensionamiento de los defectos de esta platina con el reloj comparador presento mayor dificultad, debido al pequeño tamaño de sus defectos y la no rectificación

de la misma. Aún así las medidas de profundidad máxima se reportan en la tabla VIII.

•Profundidad máxima:

TABLA VIII
PROFUNDIDAD PROMEDIO MÁXIMA DE LOS DEFECTOS NUMERADOS EN LA PLATINA DE LA FIG.27

NUMERO DE DEFECTO	DISPOSITIVO DE MEDIDA				%ERROR
	RELOJ COMPARADOR (resolución 0.01mm) [mm]	RECONSTRUCCIÓN POR PROYECCIÓN DE FRANJAS [mm]			
		Perfil en dirección de las filas	Perfil en dirección de las columnas	Promedio	
1	0.16	0.16	0.21	0.19	18.75
2	0.16	0.12	0.17	0.15	6.25
3	0.16	0.15	0.18	0.17	6.25
4	0.18	0.14	0.25	0.2	11.11
5	0.12	0.11	0.17	0.14	16.67
6	0.12	0.17	0.16	0.17	41.67

En este caso por ser una superficie reflectiva, existe menor relación señal a ruido y su dimensionamiento se dificulta.

5) *Platina de Aluminio con Revelador*: Para disminuir el ruido por causa de la reflexión, se recubrió la platina con el revelador mencionado anteriormente como se observa en la Fig. 29 y se obtuvo la reconstrucción de la Fig. 30.



Fig. 29. Platina de la Fig. 27 preparada con revelador.

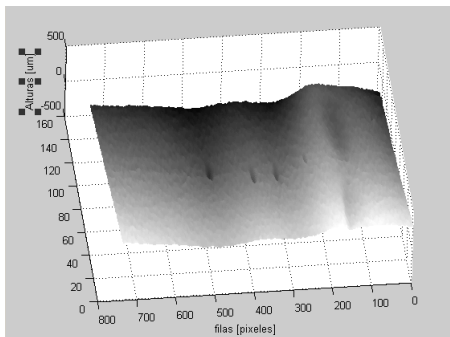


Fig. 30. Reconstrucción tridimensional de la platina de la Fig. 29.

El ruido en la reconstrucción ha disminuido notablemente y

los defectos están más definidos como se puede observar en la Fig. 31.

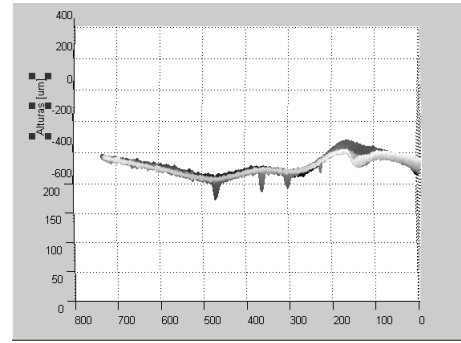


Fig. 31. Perfil de la reconstrucción tridimensional de la platina de la Fig. 29.

C. *Proyección de Franjas de Color Diferente sobre la Misma Platina*

Se proyectaron franjas de diferente color sobre la platina de la Fig. 20, como se observa en la Fig. 32.

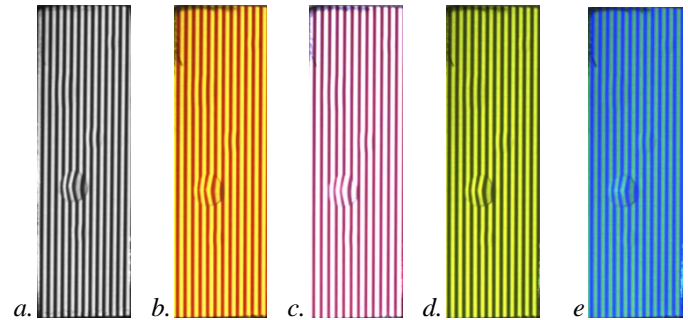


Fig. 32. a. Fondo negro franjas blancas, b. Fondo amarillo franjas rojas, c. Fondo blanco franjas rojas, d. Fondo amarillo franjas verdes, e. fondo verde franjas azules.

Se midió la profundidad del defecto 4, para comparar la medida en cada caso, con la tomada con el pie de rey digital. Estas medidas se muestran en la tabla IX.

Una comparación entre los perfiles de las imágenes de intensidad capturadas, permitió ordenar las combinaciones en orden descendente como se muestra en esta tabla. Este análisis muestra que la combinación fondo blanco, franjas rojas, es la que mayor comportamiento sinusoidal presenta antes del filtrado en frecuencia. Por otro lado la combinación fondo verde, franjas azules, presenta un perfil que tiende a una onda triangular, por lo cual su medida será menos confiable, debido a que el método está diseñado para franjas de perfil sinusoidal.

TABLA IX
PROFUNDIDAD MÁXIMA DEL DEFECTO 4 DE LA PLATINA DE LA FIG. 20

COMBINACIÓN		DISPOSITIVO DE MEDIDA		%ERROR
COLOR DE FONDO	COLOR DE FRANJAS	PIE DE REY DIGITAL (resolución 0.01mm) [mm]	RECONSTRUCCIÓN POR PROYECCIÓN DE FRANJAS [mm]	
BLANCO	ROJO	1.40	1.57	12.14
NEGRO	BLANCO		1.56	11.43
AMARILLO	ROJO		1.56	11.43
AMARILLO	VERDE		1.57	12.14
VERDE	AZUL		1.47	5.00

Este efecto se puede ver en la Fig. 32 donde se muestran las reconstrucciones para los dos extremos mencionados.

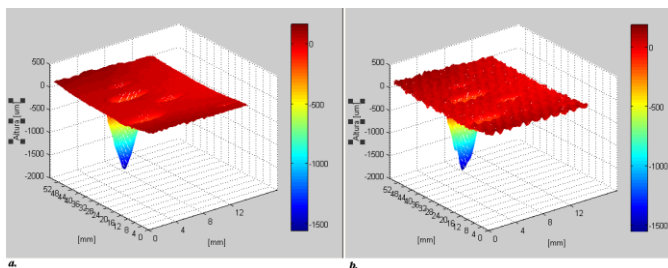


Fig. 33. Reconstrucción tridimensional con franjas de diferente color. a. Fondo blanco franjas rojas. b. Fondo verde franjas azules.

IX. CONCLUSIONES

El método implementado permitió la reconstrucción tridimensional de defectos superficiales en platinas metálicas y su efectividad está en función del contraste mostrado por las franjas, así como de la obtención de un perfil sinusoidal de las mismas.

Se implementaron algoritmos que permitieron la reconstrucción y el dimensionamiento de defectos superficiales en platinas a partir del tratamiento de imágenes usando el método de proyección de franjas.

Mediante el método se pudo establecer una relación entre imágenes de defectos provocados sobre platinas de diferente color y textura, y la profundidad de los mismos.

Se determinó cuales son las características adecuadas de una proyección de franjas de color, para una correcta reconstrucción de la superficie en observación.

Puesto que el método está desarrollado para imágenes de intensidad de franjas de perfil sinusoidal, es indispensable en el caso del uso de un proyector convencional, un filtrado de las imágenes del objeto a reconstruir, para eliminar armónicos de frecuencias mayores a la fundamental.

Con el método de reconstrucción implementado en esta investigación, se obtuvo una resolución de aproximadamente 50um, lo que hace pertinente su uso en la extracción de parámetros tales como longitud, máxima profundidad y diámetro de los defectos para la evaluación de integridad de

tuberías.

Los errores reportados en los resultados se presentan debido al ruido residual del sistema que no es eliminado con el filtrado, además de la incertidumbre en la medida de comparación realizada manualmente ya que esta se encuentra en el orden de los micrómetros.

Este método no permite medir la rugosidad de las platinas debido a que estas se encuentran en el orden de las decenas de micrómetros. Para tal fin se recomienda disminuir el área de trabajo y el grosor de las franjas proyectadas para obtener mayor resolución.

X. REFERENCIAS

- [1] Z. M. Pérez, and L. Romero, "Sistema Óptico de Reconstrucción Tridimensional para la Detección de Ampollas en Recubrimientos," Trabajo de Grado, Escuela de Física, Universidad Industrial de Santander, 2004.
- [2] D. Tulsiani, "A Fringe Projection System for Measurement of Condensing Fluid Films in Reduced Gravity," Thesis, Worcester Polytechnic Institute, November 22, 2005.
- [3] W. Osten, "Optical inspection of microsystem," New York: Taylor & Francis Group, LLC, 2007, cap 5, pp. 151.
- [4] A. Martínez, J. A. Rayas, J. M. Flores, R. Rodríguez, and D. Donato, "Técnicas Ópticas para el contorno de superficies tridimensionales," Revista Mexicana de Física, Sociedad Mexicana de Física, vol. 51, numero regular 4, pp. 431-436, 2005.
- [5] R. Palmer-Jones, P. Hopkins, and D. Eyre, "Understanding the results of an intelligent pig inspection," Penspen Integrity, UK.
- [6] W. D. Corbett, "Revestimientos protectores industriales," ASTM Standardization News, Noviembre, 2006.
- [7] J. W. Insausti, P. Benedetti, L. Iurman, A. Lucaioli, P. Traversa y N. Mazini. "Comparación de rugosidades de superficies metálicas medidas con rugosímetro electromecánico y con análisis de imágenes de microscopía electrónica," Jornadas SAM 2000 - IV Coloquio Latinoamericano de Fractura y Fatiga, 863-870, Agosto de 2000.
- [8] Z. M. Pérez, "Aproximación Espacio-Temporal para la Medida Absoluta de la Forma 3D de un Objeto por Proyección de Franjas," Trabajo de Grado, Escuela de Física, Universidad Industrial de Santander, 2006.
- [9] D. I. Serrano, A. Martínez, J. A. Rayas, y A. Serrano, "Topografía de objetos por proyección de franjas sintéticas," Centro de Óptica, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey Eugenio Garza Sada, Monterrey, N.L., México, 2501.
- [10] D. A. Gómez, "Dispositivo Óptico para la Reconstrucción Tridimensional de la Piel Humana por el Método de Proyección de Franjas," Trabajo de grado, Departamento de física, Universidad del Cauca, 2009.
- [11] M. Ibáñez, J. J. Báez, J. A. Delgado, J. C. Conde, "Medición de la transmitancia espectral de filtros de gelatina," Revista Mexicana de Física, Sociedad Mexicana de Física, vol. 52, numero enseñanza 1, pp. 47-50, 2006.
- [12] L. Poli, "Objetivos Telecéntricos: informaciones de base y principios de funcionamiento". Disponible en <http://www.telecentric-company.com/telecentric.php>, consultada 23 enero de 2010.
- [13] T. Luhmann, F. Bethmann, B. Herd, and J. Ohm, "Comparison and verification of optical 3-d surface measurement systems," Institute for Applied Photogrammetry and Geoinformatics, University of Applied Sciences Oldenburg, Germany
- [14] W. Lu-shen and P. Qing-jin, "Research and development of fringe projection-based methods in 3D shape reconstruction," Journal of Zhejiang University SCIENCE A 7(6):1026-1036, 2006.
- [15] The MathWorks, Inc, "Signal Processing Toolbox," 1994-2005.
- [16] Texas Instruments, "DLP™ Technology". Disponible en <http://www.plus-america.com/papers.html>, consultada 22 enero de 2010
- [17] Universidad Politécnica de Madrid, Departamento de Electrónica, Automática e Informática Industrial, "Prácticas de Robótica y Visión Artificial, Práctica 2: Adquisición y calibración de cámaras de video"
- [18] Y. D. Amaya y J. A. Ruiz, "Localización dinámica de móviles y obstáculos en una escena controlada para aplicaciones en robótica," Trabajo de Grado, Escuela Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad Industrial de Santander, 2005.

- [19] The MathWorks "Image Acquisition Toolbox 3, Acquire images and video from industry-standard hardware," 91109v04, 2007.
- [20] Textos Científicos.com, "La cámara y sus partes". Disponible: <http://www.textoscientificos.com/fotografia/camara>, consultada 20 enero de 2010.
- [21] R. Ernst, A. Weckenmann, and R. Velgan, "Local wall thickness measurement of formed sheet metal using fringe projection technique," presented at the XVII IMEKO World Congress, Metrology in the 3rd Millennium, Dubrovnik, Croatia, June 22–27, 2003.
- [22] F. Pernkopf, and P. O'Leary, "Image acquisition techniques for automatic visual inspection of metallic surfaces," *NDT&E International*, vol. 36, pp. 609–617, 2003.
- [23] L. M. Vélez, "Buenas prácticas de operación en el lavado de plantas y equipos: Guía para empresarios", ISBN 958-8009-55-3.

Anexos

ANEXO 1. MODELO MATEMÁTICO DE LAS FRANJAS PROYECTADAS

Cuando se tiene un sistema de proyección de franjas ideal, la imagen proyectada tiene un perfil sinusoidal. Sin embargo, la información que se procesa para realizar la reconstrucción, proviene de la función de intensidad captada por la cámara, cuya función está descrita por [8]:

$$I(x_o, y_o) = I_R(x_o, y_o) + A_R(x_o, y_o) * \cos(\Phi_o(x_o, y_o)) \quad (1)$$

En esta función, I_R representa la intensidad del fondo de la imagen, y A_R es el término de modulación que representa el contraste de las franjas [2], [10].

Si la proyección se realiza sobre el plano de referencia, $\Phi_o(x_o, y_o)$ es la fase inicial de cada punto sobre el plano de referencia, y codifica la deformación inicial de las franjas teniendo en cuenta la no telecentricidad del sistema, el ángulo α entre los ejes ópticos de proyección y observación, la influencia de las aberraciones geométricas [8] y las imperfecciones del mismo plano de referencia.

Como se mencionó en el capítulo III, al ubicar el objeto a reconstruir, sobre el plano de referencia, las franjas sufren una deformación en dirección del eje x_o , y (1) se convierte en:

$$I(x_o, y_o) = I_R(x_o, y_o) + A_R(x_o, y_o) * \cos(\Phi_o(x_o, y_o) + \Delta\Phi(x_o, y_o)) \quad (2)$$

Donde se puede observar que cada cambio en la altura del punto de coordenadas (x_o, y_o) del objeto observado, se manifiesta como un cambio $\Delta\Phi(x_o, y_o)$, en la fase $\Phi(x_o, y_o) = \Phi_o(x_o, y_o) + \Delta\Phi(x_o, y_o)$ de la intensidad observada para ese punto.

Reescribiendo (2) se obtiene:

$$I(x_o, y_o) = I_R(x_o, y_o) + A_R(x_o, y_o) * \cos(\Phi(x_o, y_o)) \quad (3)$$

Por lo tanto la altura de cada punto del objeto, esta codificada en su fase Φ , y si se logra extraer esta fase, se puede recuperar entonces su altura.

ANEXO 2. MÉTODO DE CORRIMIENTO DE FASE

En este método, se ubica el objeto y se captura una imagen de intensidad cada vez que se varía la fase en una cantidad Φ_i [8].

$$\Phi_i = \left(\frac{2\pi}{N}\right)(i - 1) \quad i=1, 2, 3, \dots, N \quad (4)$$

Puesto que en (3) que describe la intensidad al ubicar el objeto, existen tres incógnitas I , A , Φ ; se necesitan mínimo tres ecuaciones linealmente independientes para encontrar la función de fase Φ , por lo que se utilizó un algoritmo de 4 imágenes de intensidad con cambios sucesivos en la fase, dados por (4), donde $N=4$.

Las imágenes de intensidad obtenidas están descritas por:

$$I_i(x_o, y_o) = I_R(x_o, y_o) + A_R(x_o, y_o) * \cos(\Phi(x_o, y_o) + \Phi_i(x_o, y_o)) \quad (5)$$

Utilizando propiedades ortogonales de las funciones cosenoidales se obtiene [8]:

$$\tan(\Phi) = \frac{\sum_{i=1}^N I_i * \sin(\Phi_i)}{\sum_{i=1}^N I_i * \cos(\Phi_i)} \quad (6)$$

$$A_R = \frac{2}{N} \sqrt{\left[\sum_{i=1}^N I_i * \sin(\Phi_i)\right]^2 + \left[\sum_{i=1}^N I_i * \cos(\Phi_i)\right]^2} \quad (7)$$

Por lo tanto, si se tienen las imágenes de intensidad y su respectivo corrimiento de fase, se puede obtener tanto la función fase como la función contraste para cada punto del objeto.

Debido a que los corrimientos de fase se hicieron hacia la derecha, las ecuaciones se convierten en [10]:

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

$$2A_R = \sqrt{(I_4 - I_2)^2 + (I_3 - I_1)^2} \quad (9)$$