

CENTRO DE INVESTIGACIONES
EN ÓPTICA, A.C.

MEDICIONES EN 360° BASADAS EN HOLOGRAFÍA DIGITAL INTERFEROMÉTRICA



Tesis para obtener el grado de:
Maestro en Optomecatrónica

Presenta: Ing. Ubaldo Uribe López

Dirigida por: Dra. María del Socorro Hernández Montes

Septiembre de 2015
León, Guanajuato, México

*A mis dos hermosas hijas,
Estefanía y Amisha.
Con todo mi amor.*

AGRADECIMIENTOS

A mi esposa Estefanía con todo mi cariño, por siempre creer en mí y darme todo su apoyo aún en los momentos más difíciles.

A mis padres, por todos los sacrificios que han tenido que pasar para que yo pudiera salir adelante. Por su gran ejemplo de amor que me han demostrado.

A mi asesora la Dra. María del Socorro, por todo el tiempo que ha dedicado en mí, la paciencia que me ha tenido y el conocimiento que ha compartido al guiarme en este proyecto.

Al Dr. Silvino Muñoz por ayudarme con su conocimiento en la realización de esta tesis.

ÍNDICE

RESUMEN.....	- 6 -
OBJETIVOS	- 7 -
JUSTIFICACIÓN	- 8 -
ANTECEDENTES	- 10 -
INTRODUCCIÓN	- 12 -
REFERENCIAS	- 13 -
CAPÍTULO 1	- 14 -
1. CONCEPTOS BASICOS DE LAS TECNICAS OPTICAS NO DESTRUCTIVAS.	- 14 -
1.1. PATRONES DE MOTEADO	- 14 -
1.2. HOLOGRAFÍA DIGITAL	- 14 -
1.2.1. HOLOGRAFÍA DIGITAL INTERFEROMÉTRICA (HDI).....	- 15 -
1.3. SISTEMA INTERFEROMÉTRICO FUERA DE PLANO.....	- 15 -
1.3.1. VECTOR DE SENSIBILIDAD	- 19 -
1.4. MÉTODO DE EVALUACIÓN DE LA TRANSFORMADA DE FOURIER	- 20 -
1.5. DETERMINACIÓN DE DIFERENCIA DE FASE.....	- 22 -
1.6. OBTENCIÓN DE FORMA.....	- 23 -
1.6.1. MÉTODO DE DOS PUNTOS DE ILUMINACIÓN POR DOBLE EXPOSICIÓN	- 23 -
REFERENCIAS	- 25 -
CAPÍTULO 2	- 26 -
2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA OPTOMECASTRÓNICO.	- 26 -
2.1. FUNCIONAMIENTO GENERAL DEL SISTEMA	- 26 -
2.2. SISTEMA MECATRÓNICO	- 28 -
2.2.1. CONTROLADOR DE MOTOR A PASOS	- 28 -
2.2.1.1. SOFTWARE DE CONTROL DE MOTORES EN LABVIEW	- 28 -
2.2.1.2. SOFTWARE DE INTERFAZ PARA MICROCONTROLADOR MSP430G2553.....	- 31 -
2.2.2. INTERFAZ ELECTRÓNICA.	- 32 -
2.2.3. MOTORES A PASOS.	- 34 -
2.3. CAPTURA DE IMÁGENES	- 35 -
2.3.1. CARACTERÍSTICAS DE LA CÁMARA PCO.PIXELFLY USB	- 36 -
2.3.2. DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE DE CAPTURA DE IMÁGENES.	- 37 -
CAPÍTULO 3	- 40 -
3. ARREGLO ÓPTICO.....	- 40 -
3.1. DESCRIPCIÓN DEL ARREGLO ÓPTICO PARA LA DETERMINACIÓN DE FORMA.....	- 40 -

3.1.1.	CÁLCULO DE VECTOR DE SENSIBILIDAD PARA MEDICIÓN DE FORMA.	- 44 -
3.1.2.	CÁLCULO DE RESOLUCIÓN DEL SISTEMA	- 45 -
3.2.	DESCRIPCIÓN DE ARREGLO ÓPTICO PARA DETERMINAR DEFORMACIÓN	- 49 -
3.2.1.	CÁLCULO DE VECTOR DE SENSIBILIDAD PARA CUANTIFICACIÓN DE DEFORMACIÓN	- 51 -
	REFERENCIAS	- 53 -
	CAPÍTULO 4	- 54 -
4.	RECONSTRUCCIÓN DIGITAL DEL OBJETO.....	- 54 -
4.1.	DESCRIPCIÓN GENERAL PARA LA RECONSTRUCCIÓN DIGITAL A 360°	- 54 -
4.2.	ANÁLISIS DE FASE POR EL MÉTODO DE FOURIER	- 55 -
4.2.1.	DETERMINACIÓN DE FORMA	- 56 -
4.2.2.	DETERMINACIÓN DE DEFORMACIÓN.....	- 63 -
4.3.	INTEGRACIÓN DE VISTAS.....	- 65 -
4.3.1.	RECONSTRUCCIÓN DE SUPERFICIE A 360°	- 66 -
4.3.2.	INSERCIÓN DE DEFORMACIÓN A 360°	- 69 -
	CAPÍTULO 5	- 71 -
5.	RESULTADOS.	- 71 -
5.1.	RESULTADOS DEL CILINDRO LISO DE ALUMINIO.....	- 71 -
5.2.	RESULTADOS DEL CILINDRO CON ESCALÓN.	- 74 -
	CAPÍTULO 6	- 78 -
6.	CONCLUSIONES Y TRABAJO A FUTURO.....	- 78 -
6.1.	CONCLUSIONES	- 78 -
6.2.	TRABAJO A FUTURO.....	- 80 -

ÍNDICE DE FIGURAS

Capítulo 1

- Figura 1. 1. Interferómetro con configuración fuera de plano.
- Figura 1. 2. Contorneo por dos puntos de iluminación.

Capítulo 2

- Figura 2. 1. Diagrama a bloques de los elementos del sistema de reconstrucción 3D.
- Figura 2. 2. Panel Frontal del programa controlador de motores a pasos en LabView.
- Figura 2. 3. Máquina de estados del software controlador de los motores a pasos en LabView
- Figura 2. 4. Diagrama de disposición de pines de microcontrolador MSP430G2553 de Texas Instruments.
- Figura 2. 5. Tabla de descripción de entradas y salidas del microcontrolador MSP430G2553.
- Figura 2. 6. Diagrama esquemático de la interfaz electrónica.
- Figura 2. 7. Diagrama interno del circuito L293DNE.
- Figura 2. 8. Motor a pasos unipolar con montura rotacional 8MR191-28.
- Figura 2. 9. Motor a pasos unipolar con montura de traslación 8MT173.
- Figura 2. 10. Dimensiones mecánicas de la cámara PCO.PixelFly USB.
- Figura 2. 11. Diagrama de flujo de software para la captura de imágenes en LabView por la cámara PCO.PixelFly USB.
- Figura 2. 12. Interfaz de usuario del software para la captura de imágenes con la cámara PCO.PixelFly.

Capítulo 3

- Figura 3. 1. Arreglo óptico para obtener la forma del objeto
- Figura 3. 2. Representación de vector de sensibilidad para determinación de forma.
- Figura 3. 3. Diagrama para la medición de la altura en la superficie usando HDI.
- Figura 3. 4. Componentes (x, z) para a) vector unitario \vec{A} y para b) vector unitario \vec{A}' .
- Figura 3. 5. Arreglo óptico para obtener deformaciones por vibración a) vista superior; b) vista lateral.
- Figura 3. 6. Representación de vector de sensibilidad para determinación de deformación.

Capítulo 4

- Figura 4. 1. Diagrama general para la reconstrucción del objeto e inserción de deformación a 360° .
- Figura 4. 2. Pasos para la obtención de fase por el método de la Transformada de Fourier.
- Figura 4. 3. Holograma capturado del objeto en medición.
- Figura 4. 4. Holograma del objeto en el dominio frecuencial.

- Figura 4. 5. Lóbulo de información del dominio frecuencial filtrado.
- Figura 4. 6. Imagen del término de información $C(x,y)$ de la ecuación 1.20 (Transformada inversa de Fourier del lóbulo de la figura 4.5).
- Figura 4. 7. Diferencia de fase por medio de HDI. Fase envuelta del objeto en medición.
- Figura 4. 8. Fase desenvuelta de a) objeto en medición y de b) plano de referencia.
- Figura 4. 9. Forma del objeto en medición. Sustracción del plano inclinado.
- Figura 4. 10. Forma del objeto con medidas reales.
- Figura 4. 11. Modos de vibración del cilindro. Fase envuelta; objeto a a) 90° , b) 180° , c) 270° y d) 360° .
- Figura 4. 12. Modos de vibración del cilindro. Fase desenvuelta; objeto a a) 90° , b) 180° , c) 270° y d) 360° .
- Figura 4. 13. Modos de vibración del cilindro. Fases desenvueltas, representación 3D; a) 90° , b) 180° .
- Figura 4. 14. Pasos para la reconstrucción a 360° mediante la integración de caras tridimensionales.
- Figura 4. 15. Traslación de matrices en el plano (x, z) .
- Figura 4. 16. Rotación de las matrices con una nueva posición.
- Figura 4. 17. Matrices acomodadas cada 45°

Capítulo 5

- Figura 5. 1. Cilindro metálico liso. Medidas.
- Figura 5. 2. Superposición de las caras en diferentes ángulos, a) una cara a 315° ; b) dos caras superpuestas a 315° y 0° ; c) tres caras superpuestas a 315° , 0° y 45° .
- Figura 5. 3. Resultado de la reconstrucción en 360° del cilindro de muestra.
- Figura 5. 4. Resultado de la reconstrucción en 360° del cilindro de muestra, con inserción de sus deformaciones.
- Figura 5. 5. Resultados de forma y deformación en distintos ángulos y posiciones.
- Figura 5. 6. Simulación de modos de vibración en SolidWorks.
- Figura 5. 7. Cilindro metálico escalonado
- Figura 5. 8. Resultado de la reconstrucción en 360° del cilindro escalonado. Inclinación en MT de a) $50\mu m$, b) $75\mu m$.
- Figura 5. 9. Resultados de forma del cilindro escalonado. Inclinación en MT de (a) $50\mu m$, (b) $75\mu m$.
- Figura 5. 10. Tabla de diferencias en mediciones con respecto a la resolución máxima del sistema para un interferómetro fuera de plano.

NOMENCLATURAS

\vec{R}_s : Vector de fuente de iluminación del objeto.

\vec{R}_o : Vector de haz objeto a plano de observación.

\vec{d} : Vector de desplazamiento. (Sistema interferométrico fuera de plano)

θ_1 : Ángulo de fuente de iluminación y eje óptico (Sistema fuera de plano)

θ_2 : Ángulo entre haz objeto y eje óptico.

$\Delta\phi$: Diferencia de fase

DCO : Diferencia de camino óptico

λ : Longitud de onda

\vec{K} : Vector de sensibilidad

\hat{r}_s : Vector unitario de iluminación.

\hat{r}_o : Vector unitario de observación

d_z : Desplazamiento en la componente z ó \hat{w}

$|R_o|$: Magnitud del vector \vec{R}_o

$|R_s|$: Magnitud del vector \vec{R}_s

$I(x, y)$: Intensidad en un patrón de interferencia

$a(x, y)$: Amplitud del ruido ambiental; información del término de DC

$b(x, y)$: Amplitud de la interferencia

$\phi(x, y)$: Fase del interferograma

m : Magnificación o aumento lateral

h : Altura del objeto

h' : Altura de la imagen real

l_i : Distancia de la lente a la imagen

l_o : Distancia de la lente al objeto

α : Ángulo de fuente de iluminación y eje óptico (Arreglo óptico experimental)

$\Delta\theta$: Ángulo generado por el desplazamiento de la fuente de iluminación

\vec{r} : Vector de desplazamiento (Arreglo óptico experimental)

Δz : Resolución máxima de la altura en el eje óptico (z) del objeto a medir

e : Error porcentual entre el resultado con Holografía Digital Interferométrica y el valor real.

RESUMEN

En este trabajo se presenta el desarrollo para la reconstrucción digital de objetos en 3D a 360°, y la medición de los desplazamientos que sufre el objeto al aplicarle una onda de sonido empleando el mismo sistema óptico. Para estos propósitos se emplea la técnica de Holografía Digital Interferométrica (HDI) y el procesamiento digital de las imágenes por el método de la transformada de Fourier, para obtener la fase. Para medir la forma se usa el método de dos puntos de iluminación. Para estas mediciones en campo completo se realiza la implementación de un sistema embebido, con un programa automatizado desarrollado en LabView que sirve como interfaz para el registro de imágenes y para el control electrónico del posicionamiento del mecanismo rotatorio y de traslación en el sistema mecatrónico utilizado. Se creó un software en Matlab para la reconstrucción digital de objetos, y para la inserción de los desplazamientos en la forma y obtener información de su comportamiento a diferentes ángulos de vista.

OBJETIVOS

En esta tesis se describe la implementación de un sistema optomecatrónico y de software diseñado para la reconstrucción tridimensional de objetos, implementando un sistema óptico interferométrico, componentes mecánicos de movimiento con motores a pasos unipolares y sus monturas, así como la construcción de circuitos electrónicos para su control y la interfaz en software para la visualización de la representación digital. También se describe la programación del procesamiento digital de los hologramas obtenidos.

Teniendo esto como base del proyecto, se requerirán los siguientes objetivos particulares:

- Construcción del sistema optomecatrónico:
 - Tarjeta electrónica para el microcontrolador MSP430G2553 y los circuitos controladores L293DNE para motores a pasos unipolares.
 - Arreglo óptico interferométrico fuera del plano.
- Desarrollo de programas para el control del sistema optomecatrónico:
 - Control de motores para el microcontrolador en lenguaje C en el entorno de desarrollo Code Composer Studio y la interfaz de usuario en LabView.
 - Adquisición de imágenes en LabView.
- Desarrollo de algoritmos computacionales para el procesamiento de imágenes en Matlab.
 - Determinación de la forma y medida de los desplazamientos con la obtención de la fase por el método de Fourier.
 - Integración de las vistas o caras a 360° del objeto.

JUSTIFICACIÓN

En la actualidad, las empresas que realizan la construcción de materiales y componentes, ya sean desde suelas de zapatos hasta tuercas para tornillos, así como tarjetas electrónicas en la ciudad de León, Guanajuato tienen un cierto porcentaje de error en el proceso de producción.

Esto se debe a muchos factores de causa. Uno de estos es el que las máquinas de producción han sido tan utilizadas y por tanto tiempo que aunque se les realice mantenimiento, tanto preventivo como correctivo tienen cierto desgaste. Cambiar una de estas máquinas resultaría un verdadero gasto económico fuerte para la empresa que la maneja, por lo que es preferible conseguir una mejor solución a este problema.

Estas máquinas están diseñadas para resistir muchos años y para realizarles cambios de piezas no tan grandes pero si importantes. Cambiar uno de estos sería un desperdicio enorme, pero si las empresas con este problema mantienen su proceso de producción sin realizarles cambios, en pocos años más, su eficiencia disminuiría drásticamente porque su porcentaje de error aumentaría, así sea el mínimo, el cual se multiplica en una empresa que realiza miles de componentes al día.

Este problema es muy sencillo de resolver, sin tener que gastar mucho dinero en mantenimiento y compra de partes de las máquinas principales, ni tener que reestructurar todo el proceso de producción, una solución es aumentarle un último paso en este, el cual tiene que ver con la revisión de la calidad del producto.

Este proceso podrá verificar el componente visualmente a través de una o varias cámaras digitales conectadas a una computadora, la cual obtendrán todos los ángulos del componente y realizará la toma de decisiones en base a mediciones en el programa desarrollado.

Para esto se necesitará tener en cuenta diferentes factores que serían la velocidad en el procesamiento de la imagen, la practicidad de su uso, detección de errores,

entre otros. El resultado de esto es la reducción de tiempos en la detección de errores, con respecto a otros sistemas de calidad, así como la no invasión de las piezas inspeccionadas que dará una ventaja cómoda con respecto a otros sistemas destructivos o invasivos.

La practicidad es esencial en un proceso, pues se necesita esto para la reducción de costos y de tiempo. La simplicidad del proyecto es ventajosa porque será un sistema totalmente automatizado para que obtenga datos de los pasos anteriores a este y mande datos de salida automáticamente para su realimentación. Esto nos da como resultado un mejor proceso y de mayor precisión para la fábrica, al tener la mínima interfaz humana.

El propósito de este proyecto es que pueda ser útil en la detección de errores o defectos en los componentes producidos por una fábrica midiendo su forma y sus deformaciones de estos. Si se contara con programas de vanguardia hoy en día con los cuales es posible desarrollar software de control, se tendría una ventaja hacia otros sistemas de inspección porque se utilizaría una reconstrucción tridimensional del objeto a medir.

ANTECEDENTES

La HDI actualmente se ha desarrollado aceleradamente gracias a la evolución de las tecnologías tanto de software como de hardware que ha facilitado la utilización de esta técnica óptica en diversas aplicaciones. Por sus características, la holografía digital es sumamente utilizada para mediciones muy precisas orientadas más que nada al cálculo de deformaciones muy pequeñas en objetos sujetos a factores de fuerza como presión, tensión, cambios de temperatura y ondas de sonido. Existen muchos estudios realizados con esta técnica, como estudios térmicos ^[1], análisis en fluidos ^[2], estudios de vibración ^[3], en superficies para fotoelasticidad ^[4], entre otras. También se ha utilizado como método de investigación en el campo de la medicina ^[5].

Existen distintas técnicas que pueden proporcionar información acerca de la forma en la superficie de un objeto y que también nos den datos sobre sus deformaciones. A continuación se presentan algunas técnicas utilizadas para este objetivo.

La proyección de franjas ^[6] que consiste en un patrón de franjas rectas alineadas, claras y oscuras proyectadas sobre la muestra. Estas franjas son deformadas de acuerdo a la topografía del objeto dando la información de su relieve.

La proyección de un punto es una técnica de luz estructurada ^[7] la cual consiste en proyectar un haz láser sobre un espejo móvil que reflejará el haz a un objeto de muestra. Posteriormente se gira el espejo móvil para barrer la superficie del objeto en una línea recta y poder así medir su altura. La proyección de línea consiste prácticamente en el mismo procedimiento pero en vez de ir barriendo tanto vertical como horizontalmente el objeto, se realiza un barrido a una sola dirección,

utilizando así muchas menos imágenes para procesar.

La perfilometría de superficie ^[8] se basa en un sensor electromagnético controlado electrónicamente, por computadora, que calculando las coordenadas en el espacio del objeto a medir el sensor se desliza a través de la superficie determinando la altura del perfil recorrido. Esta técnica tiene la desventaja de ser intrusiva, al ejercer presión sobre el objeto.

La técnica de Interferometría electrónica de patrones de moteado (ESPI) ^[9] consiste en un sistema de obtención de patrones de moteado que puede ser similar a un sistema de holografía digital en plano o fuera de plano, diferenciándose en que se realiza una resta en sus hologramas de objeto y de referencia antes de procesarlos. También se diferencian en que por medio de ESPI se puede obtener la fase con métodos de cambio de fase o por pasos.

INTRODUCCIÓN

El tema de la investigación trata de la obtención de información detallada de la superficie sobre un objeto físico mediante la digitalización de este a 360°, por medio de una computadora, y así poder tener mediciones exactas sobre todos sus aspectos y en base a esta información poder tomar una decisión.

Este tema toma interés en empresas que tengan departamentos de producción y de calidad para la verificación de errores o deformaciones en la elaboración de los componentes. También puede influir mucho en centros de investigación o en investigaciones individuales, puesto que es un aporte científico que recaba datos de manera no destructiva, lo cual permite mantener intacta la pieza a inspeccionar, además de darnos los datos por computadora, por lo que se podría realizar una toma de decisiones en esta misma.

El contenido de esta tesis se organiza en 6 capítulos. En el primer capítulo se expone la teoría a utilizar en el proyecto como la del patrón de moteado, la Holografía Digital Interferométrica y el principio del método de evaluación de la transformada de Fourier, así como los métodos para la obtención de forma y deformación. En el capítulo dos se presenta el sistema diseñado para el prototipo optomecatrónico. El capítulo tres describe el método óptico utilizado y el desarrollo de los cálculos requeridos. El capítulo cuatro expone el desarrollo del software para el procesamiento digital de las imágenes. Esto conlleva la obtención de los hologramas, el método de Fourier para obtener la fase óptica y determinar la forma y deformación e integrar las vistas para una visualización 3D a 360 grados. En el capítulo cinco se exponen los resultados obtenidos en el proyecto. Para el capítulo seis se tendrán las conclusiones y trabajo a futuro.

Referencias

- [1] Reta Ramírez, Dalia R. (2009). Interferometría Holográfica Digital en 3D para medir desplazamientos en transistores por inducción térmica, Tesis Ing. E. T. León, Guanajuato: Universidad De La Salle Bajío, A.C., Facultad de Ingeniería en Computación y Electrónica.
- [2] Coronel A., Adrián Wulfrano (2011). Sistema para Medir Velocidad en Flujo de Fluidos en 3 Dimensiones, Tesis M. Opto. León, Guanajuato: Centro de Investigaciones en Óptica, A.C.
- [3] Santiago L., Cynthia Viridiana (2013). Métodos Ópticos No Invasivos para el estudio de la membrana Timpánica, Tesis M. C. (Óptica), León, Guanajuato: Centro de Investigaciones en Óptica, A.C.
- [4] Cornejo M., Isidro (2013). Fotoelasticidad Holográfica, Tesis M. C. (Óptica), León, Guanajuato: Centro de Investigaciones en Óptica, A.C. y Universidad de Guanajuato.
- [5] Socorro Hernández Montes, C. Pérez-López, F. Mendoza Santoyo, Detection of biological tissue in gels using pulsed digital holography. Opt. Express 12, pp. 553-858 (2004).
- [6] Zhang Z., Review of single-shot 3D shape measurement by phase calculation-based fringe projection techniques, Opt. Lasers Eng. 50, (8), 1097-1106 (2012).
- [7] Mariano Cerca, B. Barrientos García, J. García Márquez, C. Hernández Bernal (2007). Obtención del relieve digital mediante proyección de luz estructurada en modelos analógicos de extensión. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 59, 101-113.
- [8] Pedraza-Ortega J.C., Gorrostieta-Hurtado E., Ramos Arreguín J.M., Canchola-Magdaleno S. L., Aceves-Fernández M.A., Delgado-Rosas M., y Rico-Hernandez Ruth A. (2009). A Profilometric Approach for 3D Reconstruction Using Fourier and Wavelet Transforms, Advances in Artificial Intelligence, pp. 313-323.
- [9] Kerr, Rodriguez-Vera and Mendoza-Santoyo, Surface contouring using Electronic Speckle Pattern Interferometry, Proc. SPIE, 1554A, pp. 668-679. (1991).

Capítulo 1

1. CONCEPTOS BASICOS DE LAS TECNICAS OPTICAS NO DESTRUCTIVAS.

La Holografía Digital Interferométrica conforma una de las técnicas ópticas no destructivas más importantes, pues se puede obtener información valiosa de algún objeto o muestra sin deformarlo. Con este método de medición se puede adquirir la forma, deformaciones, desplazamientos, distancias, y rugosidad con una resolución nanométrica y la ventaja con otras técnicas es que es de campo completo y como ya se mencionó, no invasiva.

1.1. Patrones de moteado

Se le llama patrón de moteado ^[10] al campo de ondas en el espacio, resultado de la interferencia de varias ondas esféricas emitidas desde varios puntos de un objeto iluminado con luz coherente. El moteado o speckle es un patrón aleatorio estacionario en el tiempo pero altamente cambiante de punto a punto. Su apariencia es prácticamente independiente de las características del objeto, pero fuertemente dependientes de las propiedades ópticas del sistema de visión.

En la holografía interferométrica las motas influyen en la resolución y la precisión de la medición.

1.2. Holografía digital

La holografía digital ^[11] es el análisis y síntesis de frentes de onda mediante una computadora. Está caracterizado por permitir el registro digital de los hologramas, por lo cual posibilita el procesamiento numérico de estos, necesario para recuperar información tanto de intensidad como de fase del frente de onda.

1.2.1. Holografía digital interferométrica (HDI)

HDI ^[12] es una técnica que permite comparar frentes de onda registrados en diferentes tiempos y por lo tanto medirlos. Utilizada para medir deformaciones, formas de objetos, variaciones en el índice de refracción. Consiste en la interferencia de dos campos ópticos coherentes esparcidos por la superficie de un objeto en diferentes estados.

El primer registro corresponde a un estado inicial del objeto en análisis y el segundo registro corresponde a un estado deformado del objeto.

Una vez registrados los dos hologramas, se reconstruye y analiza la deformación a través de las diferencias de fase calculadas por medio de diversas técnicas. Un ejemplo sería el método de evaluación de la transformada de Fourier.

1.3. Sistema interferométrico fuera de plano

En este tipo de interferómetro se tiene una configuración específica para obtener sensibilidad fuera del plano (x, y) donde se encuentra el objeto de prueba, es decir que tendrá su sensibilidad máxima en el eje z del sistema, como se muestra en la figura 1.1 ^[13].

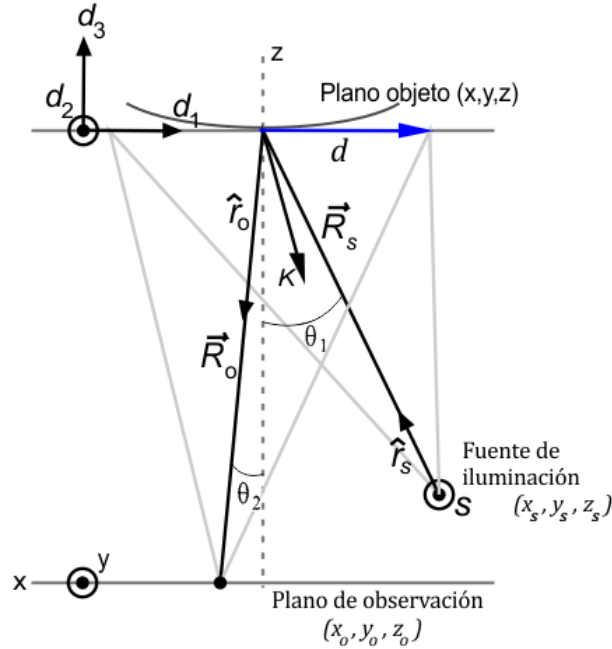


Figura 1. 1. Interferómetro con configuración fuera de plano.

Se tiene un plano objeto con coordenadas (x, y, z) donde definimos $z = 0$, es iluminado por una fuente S en el plano (x_s, y_s, z_s) , con dirección representada por el vector \vec{R}_s , y la luz que se dispersa llega a un plano de observación de coordenadas (x_o, y_o, z_o) , con dirección representada por el vector \vec{R}_o . Cuando el objeto sufre una deformación, el vector de desplazamiento d , con componentes d_1 , d_2 y d_3 en las direcciones x, y, z , resultante de un punto en particular produce una diferencia en el camino óptico (DCO), el cual causa un cambio de fase en la señal detectada en el plano de observación. Tenemos que θ_1 es el ángulo formado por el vector \vec{R}_s y el eje óptico (línea punteada en la figura 1.1; perpendicular al plano de observación). Y θ_2 corresponde al ángulo entre el vector \vec{R}_o y el eje óptico.

$$(1.1) \quad \Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} DCO$$

La ecuación (1.1) representa el cambio de fase generado por una diferencia de

camino óptico en el haz incidente en el objeto. Donde $\Delta\phi$ es el cambio de fase, λ es la longitud de onda de la luz coherente, y DCO contiene la información del desplazamiento que sufre el objeto junto con los vectores de dirección de iluminación y de observación.

El desplazamiento está definido por el siguiente vector:

$$(1.2) \quad \vec{d} = d_1\hat{u} + d_2\hat{v} + d_3\hat{w}$$

Donde $\hat{u}, \hat{v}, \hat{w}$ son los vectores unitarios en las direcciones x, y, z respectivamente.

Emprendiendo de la ecuación (1.1), el cambio de fase está dado por el siguiente producto escalar:

$$(1.3) \quad \Delta\phi = \vec{K} \cdot \vec{d}$$

Donde \vec{K} es el vector de sensibilidad del sistema. Para esta configuración, este vector está definido como:

$$(1.4) \quad \vec{K} = \frac{2\pi}{\lambda} (\hat{r}_s - \hat{r}_o)$$

Siendo \hat{r}_s el vector unitario de iluminación y \hat{r}_o el vector unitario de observación. Por lo tanto, se tiene una diferencia de fase de:

$$(1.5) \quad \Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} (\hat{r}_s - \hat{r}_o) \cdot \vec{d}$$

Esta ecuación se puede reducir a la siguiente forma común^[13]:

$$(1.6) \quad \Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} [(\cos \theta_1 + \cos \theta_2)d_3 + (\sin \theta_1 - \sin \theta_2)d_1]$$

Teniendo en cuenta que el plano utilizado en el sistema comprende los ejes (x, z) para la medición (ver figura 1.1), el término con el factor d_2 es despreciado. Para que la contribución en z sea mucho mayor, y despreciar x y y , la fuente de iluminación S se colocará a un ángulo θ_1 cercano a cero con respecto al eje óptico. Por esto, la componente en x del vector de desplazamiento \vec{d} , que es d_1 será igual a cero. Si definimos el ángulo $\theta_2 = 0^\circ$, asumiendo que el vector \vec{R}_o es paralelo al eje óptico i.e. vista normal, y cambiamos el factor d_3 por un desplazamiento general en d_z , en un punto medio de medición del plano objeto, tenemos la siguiente ecuación:

$$(1.7) \quad \Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} [(\cos \theta_1 + 1)d_z]$$

En el caso particular en que la deformación sea fuera de plano, la ecuación (1.7) representa una proyección de esta deformación sobre el vector de sensibilidad esto es que $d = d_z \mathbf{n}$ donde \mathbf{n} es un vector unitario normal a la superficie. Estas consideraciones son manejadas para determinar cambios de desplazamientos en el plano objeto, con respecto al eje óptico (eje z según la figura 1.1). Para ello es necesario encontrar d_z .

$$(1.8) \quad d_z = \frac{\lambda \Delta\phi}{2\pi (\cos \theta_1 + 1) \cos \omega}$$

Donde ω es el ángulo entre el vector de sensibilidad y la superficie normal. La superficie normal es calculada de los datos de la forma que se obtiene por el método de dos puntos de iluminación del haz objeto.

1.3.1. Vector de sensibilidad

Para obtener el vector de sensibilidad ^[13] de la ecuación (1.4) en los diferentes ejes del sistema, y correspondientes a los unitarios \hat{r}_o y \hat{r}_s , se descomponen los vectores de iluminación \vec{R}_s y de observación \vec{R}_o que se forman con el objeto:

$$(1.9) \quad \vec{R}_o = (x - x_o)\hat{u} + (y - y_o)\hat{v} + (z - z_o)\hat{w}$$

$$(1.10) \quad \vec{R}_s = (x_s - x)\hat{u} + (y_s - y)\hat{v} + (z_s - z)\hat{w}$$

La resta de los vectores con el origen $(x, y, z) = (0, 0, 0)$ dependerá de la dirección de estos. Su magnitud correspondiente sería:

$$(1.11) \quad |R_o| = \sqrt{(x - x_o)^2 + (y - y_o)^2 + (z - z_o)^2}$$

$$(1.12) \quad |R_s| = \sqrt{(x_s - x)^2 + (y_s - y)^2 + (z_s - z)^2}$$

Por la siguiente propiedad de los vectores:

$$(1.13) \quad \hat{v} = \frac{\vec{v}}{|\vec{v}|}$$

Que nos indica que un vector unitario se obtiene a partir de la división del vector entre la magnitud del mismo, podemos definir:

$$(1.14) \quad \hat{r}_o = \frac{\vec{R}_o}{|R_o|} = \frac{(x - x_o)\hat{u} + (y - y_o)\hat{v} + (z - z_o)\hat{w}}{\sqrt{(x - x_o)^2 + (y - y_o)^2 + (z - z_o)^2}}$$

$$(1.15) \quad \hat{r}_s = \frac{\vec{R}_s}{|R_s|} = \frac{(x_s - x)\hat{u} + (y_s - y)\hat{v} + (z_s - z)\hat{w}}{\sqrt{(x_s - x)^2 + (y_s - y)^2 + (z_s - z)^2}}$$

Ahora, sustituyendo las ecuaciones 1.14 y 1.15 en la ecuación 1.4, se obtiene la diferencia de fase en el plano de observación y descomponiendo para cada eje x, y, z tenemos ^[14]:

$$(1.16) \quad K_x = \frac{2\pi}{\lambda} \left\{ \left[\frac{(x_s - x)\hat{u}}{\sqrt{(x_s - x)^2 + (y_s - y)^2 + (z_s - z)^2}} - \frac{(x - x_o)\hat{u}}{\sqrt{(x - x_o)^2 + (y - y_o)^2 + (z - z_o)^2}} \right] \right\}$$

$$(1.17) \quad K_y = \frac{2\pi}{\lambda} \left\{ \left[\frac{(y_s - y)\hat{v}}{\sqrt{(x_s - x)^2 + (y_s - y)^2 + (z_s - z)^2}} - \frac{(y - y_o)\hat{v}}{\sqrt{(x - x_o)^2 + (y - y_o)^2 + (z - z_o)^2}} \right] \right\}$$

$$(1.18) \quad K_z = \frac{2\pi}{\lambda} \left\{ \left[\frac{(z_s - z)\hat{w}}{\sqrt{(x_s - x)^2 + (y_s - y)^2 + (z_s - z)^2}} - \frac{(z - z_o)\hat{w}}{\sqrt{(x - x_o)^2 + (y - y_o)^2 + (z - z_o)^2}} \right] \right\}$$

1.4. Método de evaluación de la transformada de Fourier

En el método de evaluación de la transformada de Fourier ^[15], una combinación lineal de funciones de armónicos espaciales se adapta a la distribución de intensidad grabada y registrada $I(x, y)$ en un patrón de interferencia, dada por:

$$(1.19) \quad I(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos[\phi(x, y)]$$

Donde $a(x, y)$ es una función con información ambiental de fondo; $b(x, y)$ la función de amplitud del término que contiene la información del objeto de captura del holograma; y $\phi(x, y)$ que es el término de fase del interferograma. Por la siguiente identidad trigonométrica

$$(1.20) \quad \cos(\alpha) = \frac{e^{i\alpha} + e^{-i\alpha}}{2}$$

La función de intensidad se puede expresar también de la siguiente manera:

$$(1.21) \quad I(x, y) = a(x, y) + \frac{1}{2}b(x, y)e^{i\phi(x, y)} + \frac{1}{2}b(x, y)e^{-i\phi(x, y)}$$

Las frecuencias espaciales de estas funciones armónicas que se toman se definen por la reducción de frecuencias de un filtro pasa-bandas en el dominio espacial de la frecuencia. Para esto se introduce un complejo exponencial $c(x, y)$ en la función de la intensidad.

$$(1.22) \quad c(x, y) = \frac{1}{2}b(x, y)e^{i\phi(x, y)}$$

Obteniendo así la función de intensidad en términos de $a(x, y)$, $c(x, y)$ y denotando $c'(x, y)$ como el complejo conjugado.

Continuando el método, se realiza la transformada Discreta de Fourier para $I(x, y)$ produciendo:

$$(1.23) \quad F\{I(x, y)\} = I(u, v) = A(u, v) + C(u, v) + C'(u, v)$$

Siendo (u, v) las coordenadas espaciales de frecuencia. Ya que $I(x, y)$ es una distribución real en el dominio espacial, $I(u, v)$ es una distribución Hermitiana en el dominio frecuencial, el cual significa:

$$(1.24) \quad I(u, v) = I'(-u, -v)$$

La constante $A(u, v)$ contiene el pico en cero, es decir $I(0,0)$, y son variaciones de baja frecuencia del fondo. En cuanto a las variables $C(u, v)$ y $C'(u, v)$ tienen la misma información como se puede ver en la ecuación anterior.

Efectuando el filtro pasa-bandas en el dominio frecuencial, el término $A(u, v)$ y uno de los términos ya sea $C(u, v)$ ó $C'(u, v)$ son eliminados.

El espectro restante ya no es hermitiano. Se realiza la transformada inversa de

Fourier aplicada al término $C(u, v)$ por ejemplo, nos da un complejo $c(x, y)$ con parte real y parte imaginaria sin desaparecer.

La fase de la interferencia puede ser calculada por ^[10]:

$$(1.25) \quad \phi(x, y) = \arctan \left[\frac{\text{Imag } c(x, y)}{\text{Real } c(x, y)} \right]$$

1.5. Determinación de diferencia de fase

En un patrón de interferencia se tiene la amplitud y la fase de la intensidad resultante. Para algunos casos, como el de la holografía digital interferométrica que requiere de un mínimo de dos hologramas para determinar ya sea la forma del objeto capturado o la deformación de dicho objeto, se necesita de la diferencia de fase entre dos imágenes capturadas en dos momentos diferentes de tiempo o en posiciones distintas del espacio para obtener la información requerida ^[12].

Teniendo en cuenta la ecuación (1.25) de fase, y requiriendo una diferencia de fase de esta manera:

$$(1.26) \quad \Delta\phi(x, y) = \phi_1(x, y) - \phi_0(x, y)$$

Tenemos que:

$$(1.27) \quad \Delta\phi(x, y) = \arctan \left\{ \frac{\text{real}[c_1(x, y)]\text{imag}[c_2(x, y)] - \text{imag}[c_1(x, y)]\text{real}[c_2(x, y)]}{\text{real}[c_1(x, y)]\text{real}[c_2(x, y)] + \text{imag}[c_1(x, y)]\text{imag}[c_2(x, y)]} \right\}$$

1.6. Obtención de forma.

Una aplicación de la holografía interferométrica es la generación de un patrón de franjas que corresponden a contornos de elevación constantes con respecto a un plano de referencia. Estas franjas pueden determinar la forma de un objeto en tres dimensiones.

Los interferogramas de contorno holográficos pueden ser generados por diferentes métodos, como el de dos longitudes de onda ^[16] y el de dos puntos de iluminación.

1.6.1. Método de dos puntos de iluminación por doble exposición

En el método de dos puntos de iluminación ^[17] se toman los hologramas en doble exposición, en el cual la fuente puntual que ilumina el objeto es desplazada ligeramente entre las dos exposiciones. Si el punto de iluminación S es desplazado hacia S' entre las dos exposiciones, conforme a la figura 1.2, la diferencia de camino óptico (DCO) resultante es:

$$(1.28) \quad DCO = \overline{SP} + \overline{PB} - (\overline{S'P} + \overline{PB}) = \overline{SP} - \overline{S'P}$$

$$(1.29) \quad DCO = \vec{S}_1 \overline{SP} - \vec{S}_2 \overline{S'P}$$

Donde \vec{S}_1 y \vec{S}_2 son vectores unitarios de la fuente de iluminación S , los cuales pueden ser reemplazados por un único vector unitario \vec{S} si sus longitudes son aproximadas:

$$(1.30) \quad \vec{S}_1 = \vec{S}_2 = \vec{S}$$

El vector de desplazamiento \vec{d} es introducido como un vector desde S hasta S' .

$$(1.31) \quad \vec{d} = \overrightarrow{SP} - \overrightarrow{S'P}$$

Entonces la diferencia de camino óptico es dada por:

$$(1.32) \quad DCO = \vec{d} \vec{S}$$

Tomando la ecuación (1.1) el cambio de fase correspondiente es:

$$(1.33) \quad \Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \vec{d} \vec{S}$$

La superficie del objeto es intersectada por franjas que consisten en un conjunto de hiperboloides y sus focos comunes son los puntos de iluminación S y S' .

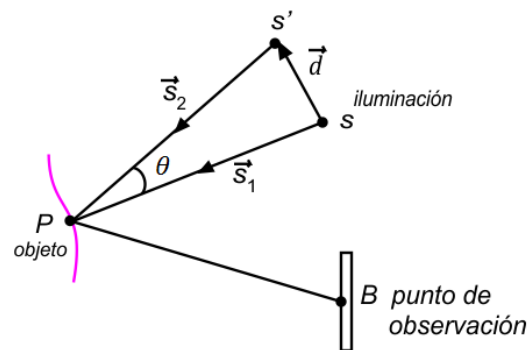


Figura 1. 2. Contorneo por dos puntos de iluminación.

La fase determinada contiene la información de la altura y la profundidad en el eje óptico implícita en el vector de desplazamiento, el cual nos provee de la forma de la superficie del objeto.

Con los conocimientos básicos de las técnicas ópticas no destructivas mencionadas en este capítulo, podemos dar paso al siguiente que detalla el diseño del sistema mecatrónico y de software de control.

Referencias

- [10] Dra. María del Socorro Hernández Montes, Apuntes de Metrología óptica, 2014.
- [11] Freddy A. Monroy y Oscar J. Rincón. (2009). Técnicas de compensación de Fase para Holografía Digital en una configuración de Reflexión. *Bistua: Revista de la Facultad de Ciencias Básica*, 7, 1-6.
- [12] Natalia Múnera Ortiz. (2013). Interferometría Holográfica Digital en Tiempo Real: Aplicación de la Cuantificación de Deformaciones Mecánicas, Tesis M.C. Física. Medellín, Colombia: Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias.
- [13] David Farrant, Jon N. Petzing, Sensitivity errors in interferometric deformation metrology, *Appl. Opt.* 42 (2003) 5634-5641.
- [14] Jorge Ramón Parra Michel, Interferometría electrónica del patrón de moteado con sensibilidad en plano para el análisis de esfuerzos mecánicos y medición de topografía usando luz divergente, CIO, A.C. León, Guanajuato, México. Febrero 2011.
- [15] Thomas Kreis. (2005). Fourier Transform Evaluation. En *Handbook of Holographic Interferometry: Optical and Digital Methods (256-258)*. Bremen, Alemania: John Wiley & Sons Ltd.
- [16] P. K. Rastogi. (2001). Digital Speckle Pattern Interferometry and related techniques. Inglaterra: John Wiley & Sons Ltd.
- [17] U. Schnars, W. Jueptner. (2005). Fundamental Principles of Holography, Holographic Contouring. En *Digital Holography: Digital Hologram Recording, Numerical Reconstruction and Related Techniques (31-34)*. Bremen, Alemania: Springer Science & Business Media.

Capítulo 2

2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA OPTOMECASTRÓNICO.

El sistema desarrollado se basó en la técnica de holografía digital interferométrica y está orientado a la obtención de información sobre la forma y deformación de objetos cilíndricos. Este es un sistema embebido que incluye elementos ópticos electrónicos, mecánicos y de software.

En este capítulo se expone el prototipo mecatrónico diseñado para la automatización del sistema, así como los algoritmos del software creado para controlarlo.

2.1. Funcionamiento general del sistema

Para desarrollar esta tesis se diseñó y se construyó un prototipo optomecatrónico que lleva componentes electrónicos, mecánicos, ópticos y elementos de programación. Este sistema se puede observar en la figura 2.1.

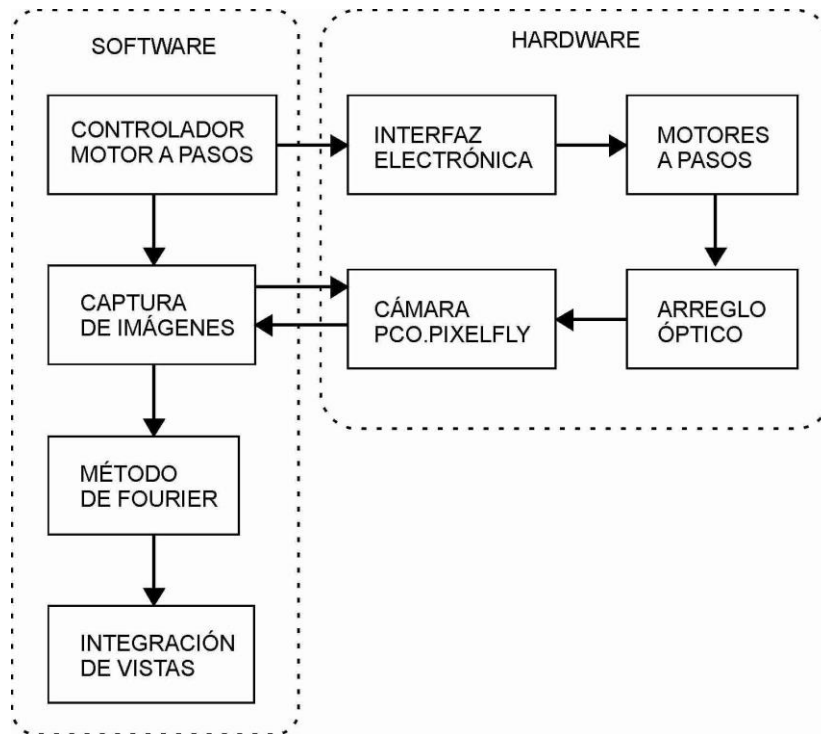


Figura 2. 1. Diagrama a bloques de los elementos del sistema de reconstrucción 3D.

En el diagrama anterior se tienen dos grupos principales, que son el software y el hardware siguiendo el orden de las flechas. El software se subdivide en cuatro programas que se pueden interpretar por sí mismos como los pasos a seguir a la finalidad del proyecto, que es la reconstrucción o detección de la forma y deformación en 3D a 360° del objeto a medir.

Se da inicio al sistema controlando los motores a pasos, primeramente capturando las imágenes requeridas del objeto, con luz coherente para formar con ellas los hologramas que posteriormente se utilizarán para la obtención de la fase. Estos primeros pasos se van intercalando con respecto al número de imágenes que se desean tomar.

Posteriormente, se hace un procesamiento digital de estas imágenes lo cual conlleva a que se realice un método de evaluación denominado método de Fourier, esto para obtener la fase envuelta de los hologramas de cada uno de los ángulos que se requirieron. Posteriormente se utilizó un algoritmo prediseñado

para el desenvolvimiento de fase. Para finalizar se hace la integración de estas caras con el fin de obtener el resultado de la reconstrucción del objeto a 360 grados.

2.2. Sistema mecatrónico

Los elementos del diagrama a bloques que componen el sistema mecatrónico para el movimiento del sistema en general son: controlador motor a pasos, interfaz electrónica y motores a pasos. A continuación se explican estos tres elementos detalladamente.

2.2.1. Controlador de motor a pasos

Se compone de dos programas, uno en LabView, que es una plataforma de desarrollo con interfaz gráfica ideal para entornos industriales y otro se realizó en Code Composer Studio (CCS) con lenguaje C, para la interfaz electrónica.

2.2.1.1. Software de control de motores en LabView

Para el primer programa se tienen dos vistas: la del panel frontal, que es la interfaz de usuario, y la del diagrama a bloques, que es el lugar donde se programa la funcionalidad.

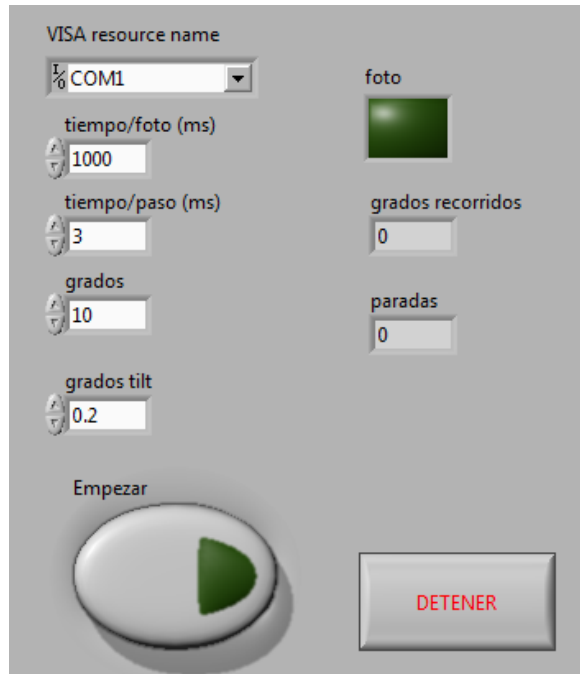


Figura 2. 2. Panel Frontal del programa controlador de motores a pasos en Labview.

El programa está desarrollado basado en una máquina de estados y su funcionalidad se explica en la figura 2.3.

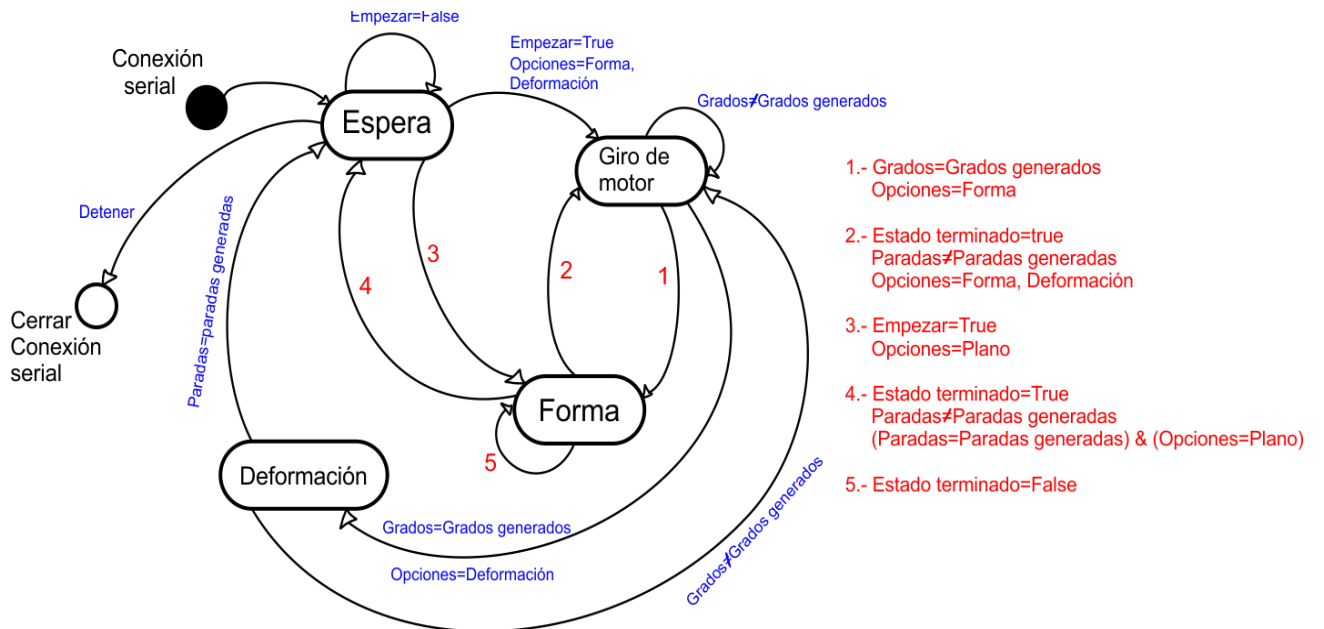


Figura 2. 3. Máquina de estados del software controlador de los motores a pasos en LabView.

Primeramente se inicia la conexión serial que comunica este software con el microcontrolador, y se manda al primer estado de nombre *Espera*. Aquí se inicializan todas las variables a utilizar, tales como los grados de rotación del objeto, la distancia de traslación del haz de iluminación dirigido al objeto, y una variable que indica el proceso del programa. Esta variable tiene tres opciones: *Plano*, *Forma* y *Deformación*. El ciclo del programa se mantiene en el estado de *Espera* hasta que se oprime el botón de *Empezar* el cual dirige al programa a otro estado dependiendo de la opción tomada.

Como se indica en la figura 2.3, cuando la variable de opción está en *Plano*, el siguiente estado será *Forma*. Este estado genera un ciclo repetitivo para el avance de las bobinas del motor a pasos que modifica la traslación de la posición del haz objeto ya mencionada anteriormente. Posteriormente, se indica en una variable compartida que se capture una imagen como referencia en un punto específico. Cuando se llega a la distancia del haz objeto, se toma otra foto en este segundo punto. Terminado esto, las bobinas del motor regresan a su punto de partida original y se regresa al estado de *Espera*.

Cuando la opción tomada es *Forma*, el programa se dirige desde el estado *Espera* hacia el estado *Giro de motor* donde se verifican los grados requeridos por el usuario. Se genera un ciclo de movimiento de rotación en este motor hasta que se llega a los grados requeridos, pasando al estado de *Forma*. En este se realiza la función de traslación descrita en el párrafo anterior y regresa al estado de *Giro de motor* para continuar su movimiento de rotación. Si las paradas del motor de rotación, determinadas por el cálculo de 360 grados entre los grados especificados por el usuario, ya han sido contadas, el programa se dirige al estado *Espera*, terminando su ciclo.

La última opción es *Deformación*. Para esta opción el programa se dirige al estado *Deformación*. Este genera una pausa de tiempo determinada por el usuario activando la variable compartida que indica la captura de imágenes tomando una

secuencia de fotos. Al terminar, el programa regresa a su estado de *Espera*.

2.2.1.2. Software de interfaz para microcontrolador MSP430G2553.

Para entender el programa del microcontrolador (MCU) MSP430G2553 se tiene la figura 2.4, que relaciona los pines y conexiones con las configuraciones que se realizaron.

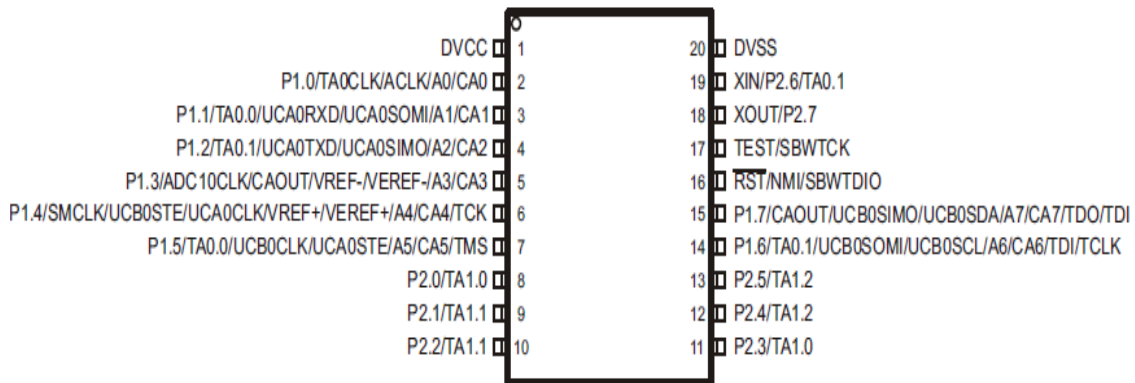


Figura 2. 4. Diagrama de disposición de pines de microcontrolador MSP430G2553 de *Texas Instruments*.

Primero se configuraron los puertos de salida para cada bobina de los dos motores a pasos a utilizar. Estos fueron los bits 4, 5, 6, y 7 del puerto uno y los bits 0, 1, 2 y 3 del puerto dos. Posteriormente se configuró la frecuencia del reloj del MCU, y se establecieron los parámetros de la comunicación serial. Se tomaron los pines P1.1 y P1.2 (del puerto uno) como receptor y transmisor serial respectivamente. Para terminar con las configuraciones se habilitó la interrupción de recepción serial, función en la cual se programó la entrada de datos desde LabView y su salida hacia los puertos ya mencionados.

Para la conexión serial en el micro se utilizó el protocolo de comunicación RS232 por medio de una interfaz UART, transmisor y receptor asíncrono universal, por sus siglas en inglés. La velocidad de transmisión utilizada para su sincronización fue de 9600 baudios.

El programa obtiene un dato tipo cadena de 8 bits, del programa controlador de motor de LabView el cual se manda como numérico. Se almacena en una variable receptora del MCU y se lee dándonos los siguientes casos:

Dato transmitido desde LabView (Numérico entero)	Dato recibido en MSP430G2553 (string/Hexadecimal)	Motor de destino	Pin de puertos
0	0x30	1, 2	P1.x, P2.x
1	0x31	1	P1.7
2	0x32	1	P1.5
3	0x33	1	P1.6
4	0x34	1	P1.4
5	0x35	2	P2.3
6	0x36	2	P2.1
7	0x37	2	P2.2
8	0x38	2	P2.0

Figura 2. 5. Tabla de descripción de entradas y salidas del microcontrolador MSP430G2553.

2.2.2. Interfaz electrónica.

El siguiente elemento a explicar es la interfaz electrónica. Se diseñó el siguiente diagrama electrónico.

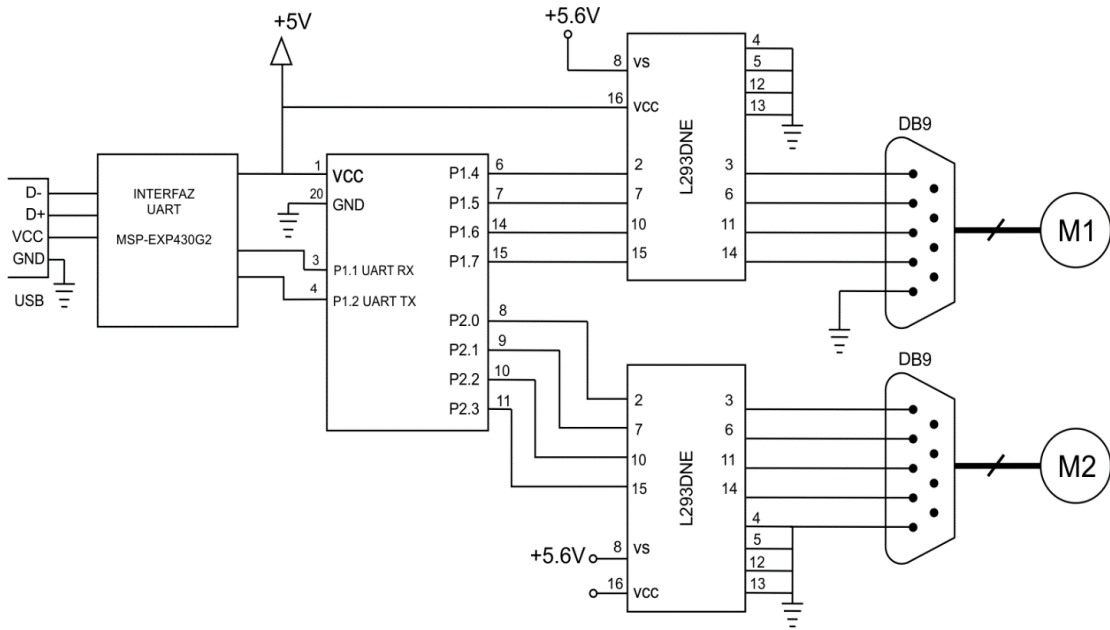


Figura 2. 6. Diagrama esquemático de la interfaz electrónica.

En la figura 2.6 se puede observar el flujo que tiene la interfaz electrónica en cuanto al paso de datos desde la computadora hasta los motores a pasos.

Comienza con la tarjeta de depuración y programación de Texas Instruments MSP-EXP430G2 conectada vía USB a la computadora. Este circuito recibe los datos de la PC y los envía por el protocolo UART hacia el microcontrolador MSP430G2553. Como ya hemos visto, el programa reacciona a ciertos datos, obteniendo un dato booleano de salida en los puertos.

Posteriormente se conecta en las entradas de un circuito L293DNE las salidas del MCU. Este circuito tiene, además de su conexión a tierra y voltaje del microcontrolador, una entrada de voltaje de una fuente externa. Esto es para que sus salidas puedan ser conectadas a los motores y estos se suministren de la corriente de la fuente externa y no de la del MCU directamente.

El circuito L293DNE se compone de dos controladores de tipo “puente-H” que realiza una interfaz entre fuentes de alimentación enviando los mismos datos de

entrada pero con el voltaje de la fuente externa.

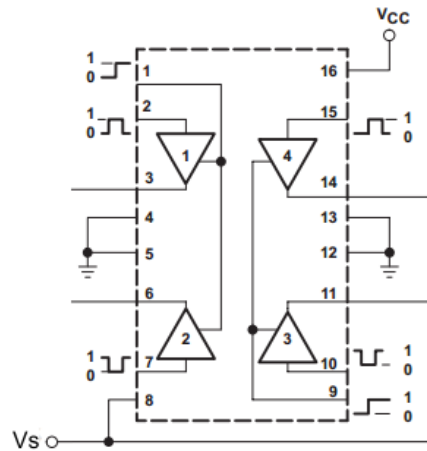


Figura 2. 7. Diagrama interno del circuito L293DNE.

2.2.3. Motores a pasos.

Se utilizaron dos motores a pasos, M1 y M2 de tipo unipolar marca Standa. El motor y su montura con número de serie 8MR191-28 (Figura 2.8), son utilizados para rotar el objeto de prueba los grados determinados en la sección 2.2.1.1. La característica de este motor es que gira 200 pasos por revolución, y la montura permite obtener 1 grado por cada 100 pasos del motor. Por lo que este sistema nos da una resolución de 36,000 pasos por vuelta completa, es decir por cada 360° en la montura.

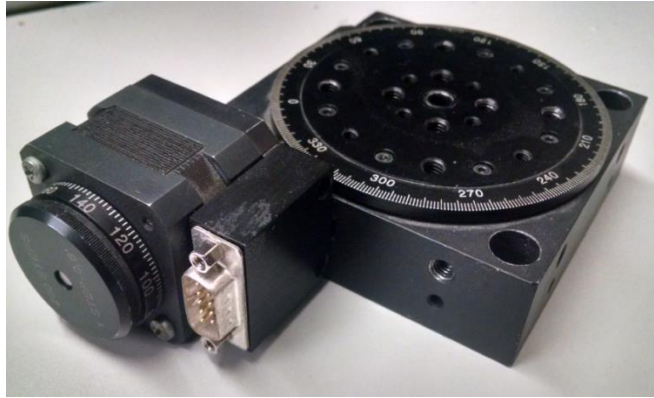


Figura 2. 8. Motor a pasos unipolar con montura rotacional 8MR191-28.

El motor usado para traslación está montado a una estructura con número de serie 8MT173 (Figura 2.9). Y tiene una resolución de $1.25\mu\text{m}$ por paso. Este sistema es utilizado para obtener una imagen de referencia y una con inclinación del objeto a medir, en la parte de la obtención de forma, basándonos en HDI.



Figura 2. 9. Motor a pasos unipolar con montura de traslación 8MT173.

2.3. Captura de imágenes

Esta sección se compone de dos elementos, que son la cámara a utilizar y el software desarrollado para capturar la imagen. A continuación se detallan los dos primeros elementos que darán paso al siguiente capítulo sobre el sistema óptico diseñado.

2.3.1. Características de la cámara PCO.PixelFly USB

Para la captura de las imágenes se utilizó una cámara PCO.Pixelfly con interfaz de conexión USB 2.0 y sensor CCD. Esta cámara consta de un sistema de alto rendimiento con un rango dinámico de 14 bits. Los tiempos de exposición van desde los 5µs hasta los 6 segundos. Su resolución es de 1392 x 1040 píxeles, con un tamaño de pixel cuadrado de 6.45µm x 6.45µm. Su rango espectral va desde 290nm hasta los 1100nm.

Su rango de temperaturas con los que puede trabajar es de 10°C hasta 45°C. La humedad de operación es del 10% hasta el 80%. Tiene un consumo de potencia menor a los 4 watts.

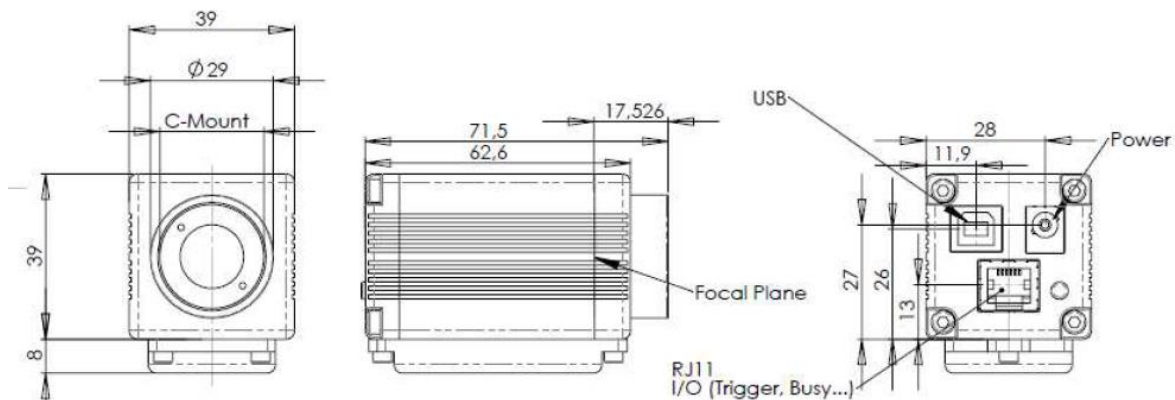


Figura 2. 10. Dimensiones mecánicas de la cámara PCO.Pixelfly USB

Se utilizó esta cámara porque para la HDI se requiere de una alta resolución (mayor a 1000 x 1000 píxeles), y de un adecuado tiempo de exposición, que aunque no es tan grande, es completamente útil para el sistema de este proyecto. Además de tener una conexión USB que facilita la utilización en cualquier computadora actual.

2.3.2. Descripción del software de captura de imágenes.

El software para la captura de las imágenes se obtuvo del fabricante de la cámara. Éste facilita una serie de ejemplos para programación en LabView, uno de los cuales fue requerido y modificado para el caso en específico del registro de imágenes de dos diferentes maneras, que son para la obtención de la forma y para la detección de modos de vibración. También se modificó para guardar las imágenes como archivos con formato “txt”, puesto que este formato respeta el valor de cada uno de los datos adquiridos sin modificación, para que posteriormente sean leídos en Matlab y procesados.

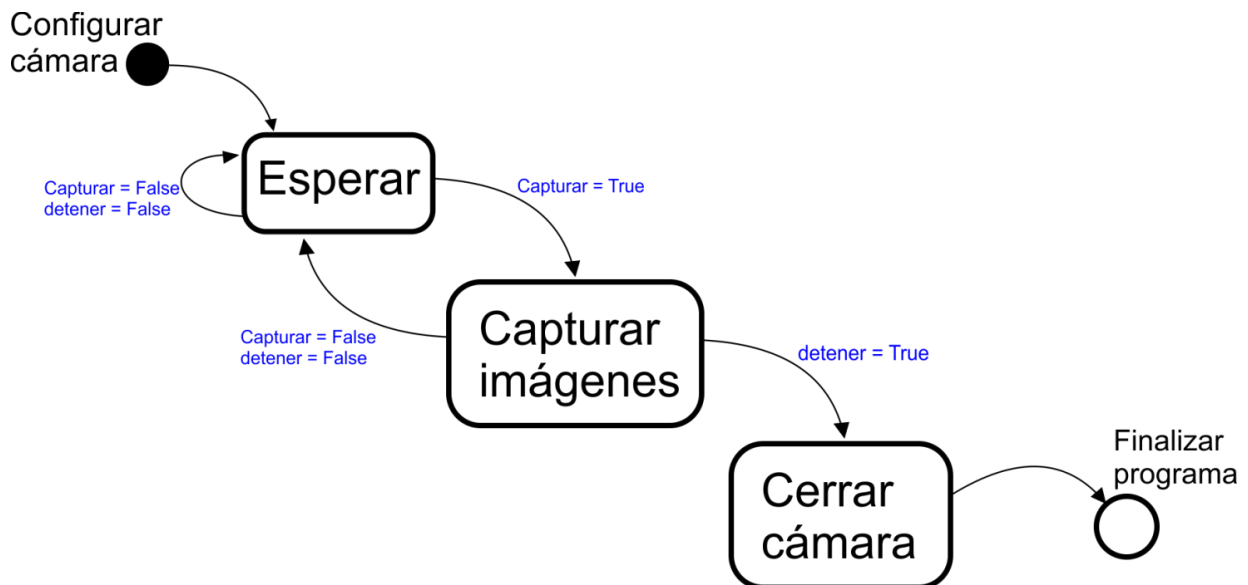


Figura 2. 11. Diagrama de flujo de software para la captura de imágenes en LabView por la cámara PCO.PixelFly USB.

En la figura 2.11 se define el flujo que sigue el programa que captura las imágenes.

Iniciando, se configura el programa obteniendo los datos de la cámara, tales como la versión, el tipo de cámara su número de serie. También se configura la paleta de escala de grises para la gráfica de intensidad a grabar.

Posteriormente se avanza a un estado de espera, en el que se adquieren otros datos de la cámara que sirven para la obtención de las imágenes. La tasa de

pixeles, el modo de disparo, el tiempo de retardo, la región de interés que se detecta obteniendo los pixeles horizontales y verticales, y por último el valor del tiempo de exposición. El tiempo de exposición varía según una variable compartida que se manda desde el programa controlador de motores la cual nos indica una de las tres opciones ya comentadas en la sección 2.2.1.1.

Cuando el programa del controlador de motores envía la indicación de capturar una imagen, el software de la cámara avanza al estado de capturar imágenes, donde la cámara utiliza el espacio libre en la computadora y son grabadas a 16bits en una ruta temporal y se obtienen añadiendo un buffer para recibirlas. Las imágenes son guardadas en una carpeta especificada en la variable compartida de las opciones a tomar en el programa de los motores. Para esto se realizó una función que acomoda los datos de las intensidades grabadas en un archivo de texto dándole como nombre el número de imagen conforme se van adquiriendo.

Al cerrar el programa, el buffer utilizado, es liberado y la configuración de la cámara se cierra.

La figura 2.12 muestra la interfaz de visualización de usuario del software desarrollado en LabView. Este programa Tiene una gráfica de intensidad para observar la imagen capturada, y controles para los tiempos de exposición tanto para obtener la forma como para la deformación.

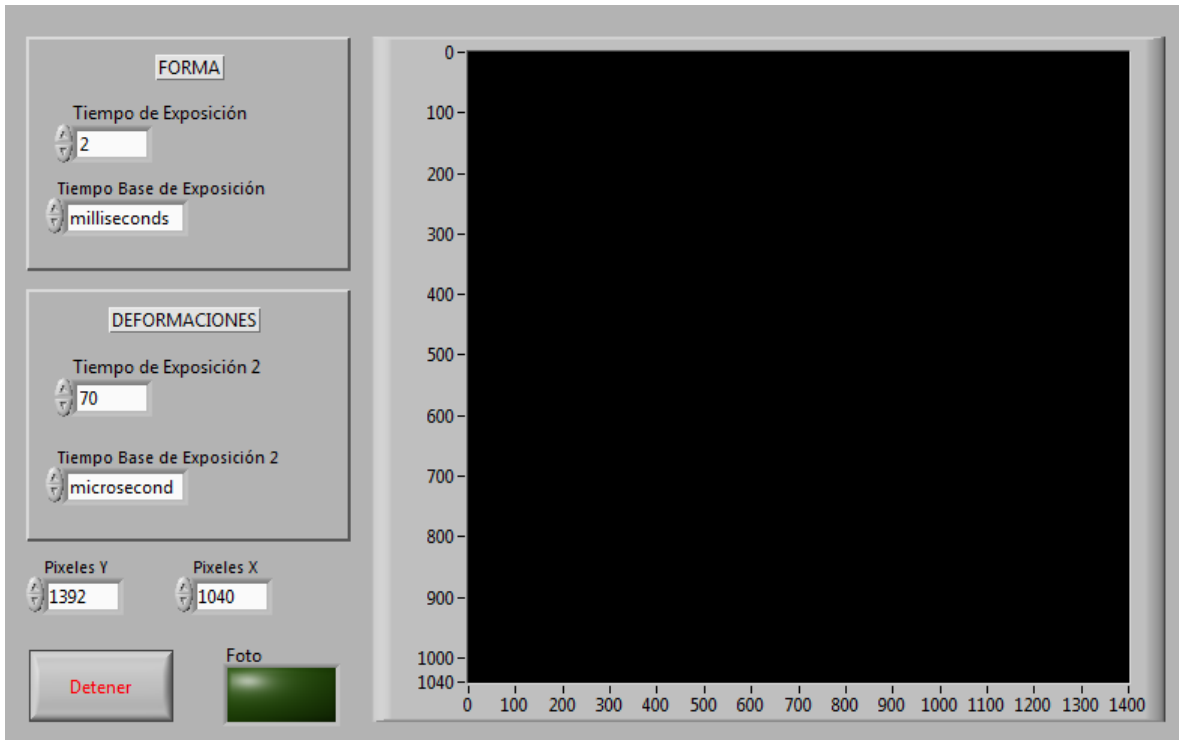


Figura 2. 12. Interfaz de usuario del software para la captura de imágenes con la cámara PCO.Pixelfly

La siguiente parte del sistema optomecatrónico a explicar es la de los elementos ópticos. Un arreglo basado en la HDI, que define el tipo de imágenes, su resolución y la información que se puede obtener en base a sus características.

Capítulo 3

3. ARREGLO ÓPTICO.

Aquí se presentan los arreglos ópticos para HDI que se utilizaron para la obtención de los hologramas que dan la información de forma y deformación. Se explican las diferencias a modificar para obtener las dos diferentes características del objeto de prueba.

3.1. Descripción del arreglo óptico para la determinación de forma.

Para obtener la forma del objeto se utilizó un sistema interferométrico con sensibilidad fuera de plano, empleando la técnica de HDI. Con este arreglo óptico se puede definir la altura, el ancho y la profundidad del objeto de prueba.

Se usó el siguiente equipo:

- Láser DPSS Cobolt Samba de 500mW con $\lambda=532\text{nm}$
- 2 cubos divisores de haz (uno utilizado para combinar)
- 2 objetivos de microscopio
- 2 fibras ópticas monomodales
- 1 cámara PCO.Pixelfly USB
- 1 lente convergente $f=4\text{cm}$
- 1 abertura óptica
- Motor a pasos con montura rotatoria
- Motor a pasos con montura de traslación
- Objeto metálico cilíndrico para medición

- Plano de MDF (tablero de fibras de madera de densidad media)

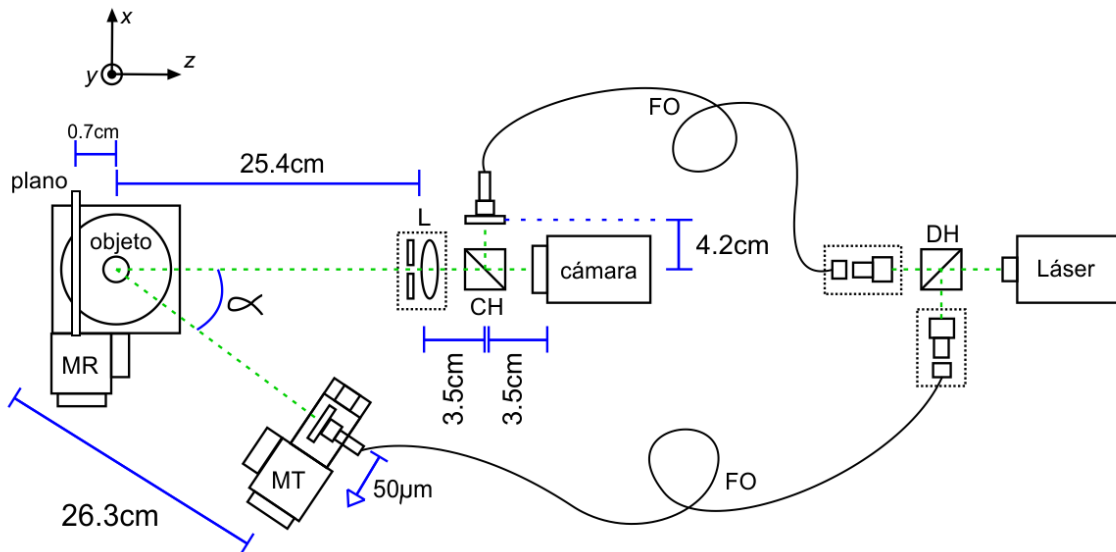


Figura 3. 1. Arreglo óptico para obtener la forma del objeto.

El láser de longitud de onda de 532nm y potencia de 500mW, pasa a través de un cubo divisor de haz (DH) con una proporción de 30-70% entrando cada porción a un objetivo de microscopio que enfocan la luz a sus fibras ópticas (FO) correspondientes. La porción de mayor intensidad es dirigida hacia la montura de traslación (MT) para ser ocupada como fuente de iluminación hacia el objeto. En cuanto a la de menor intensidad, se dirige hacia una montura estática para usarse como haz de referencia.

La fuente de iluminación de la montura de traslación, la cual es divergente, es dirigida hacia el objeto y el plano que se encuentran en la montura de rotación (MR), con un ángulo $\alpha = 43^\circ$ respecto al eje óptico. La luz incidente en el objeto es reflejada hacia la pupila (apertura óptica) y la lente (L) en el eje de la cámara. Ver figura 3.1.

Por último, para generar un holograma, el haz objeto y el haz de referencia se unen en el combinador de haces (CH) y se graban en el sensor CCD de la cámara.

Para obtener la forma del objeto, al crear un ángulo amplio entre la fuente de iluminación y el eje óptico, las componentes (x, z) tienen una alta contribución de información en la diferencia de fase. El ángulo ideal para que la contribución en x sea la correcta sería de 90° pero eso genera mucha sombra en el objeto medido, por lo que es necesario tener una buena relación entre contribución en x y la iluminación del objeto. Es por eso que se realizó prácticamente a la mitad (43°).

El propósito de la montura rotatoria es obtener dos hologramas cada cierto ángulo, el cual se establece y rota por medio del software descrito en la sección 2.2.1.1, así tenemos la información requerida a su 360° . Se requieren dos hologramas para realizar la diferencia de fase para cada cara del objeto de muestra, y si se rota a múltiplos de 45° , se capturarán ocho caras, dando un total de 16 fotografías para la reconstrucción completa.

La montura de traslación se modifica para crear una deformación en el haz objeto y poder obtener dos hologramas, el primero de referencia y el segundo con una pequeña inclinación de $50\mu\text{m}$ hacia afuera del sistema como se observa en la figura 3.1.

Se usó como objeto un cilindro de aluminio fabricado en el laboratorio con material de una lata de refresco con dimensiones de $17.5\text{mm} \times 23.4\text{mm}$ de diámetro y de alto respectivamente y 0.013mm de grosor, y como plano, una pieza de MDF, las dos piezas pintadas con revelador blanco.

El objeto de altura máxima a formar imagen es de 24.34mm que fue calculada por medio de la medida del sensor CCD que es de $6.45\mu\text{m}$ por pixel, y si tenemos 1040 pixeles en vertical, la medida total es de 6.708mm . También hay que tener en cuenta la distancia focal de la lente que es de 40mm . Ahora, con la fórmula de

Gauss ^[18] para una lente delgada convergente, podemos obtener su magnificación o aumento lateral (m) de la siguiente forma

$$(3.1) \quad m = \frac{h'}{h} = \frac{l_i}{l_o}$$

Donde h' es la altura de la imagen generada posterior a la lente, es decir en el sensor, h es la altura del objeto, l_i es la distancia que hay de la lente a la imagen y l_o será la distancia entre la lente y el objeto. Para obtener el tamaño máximo h_{max} de un objeto, con respecto a las distancias de trabajo del arreglo óptico construido, la altura de la imagen deberá ser igual al tamaño del sensor en vertical.

$$(3.2) \quad h_{max} = \frac{l_o * h'_{CCD}}{l_i}$$

Sustituyendo los datos tenemos:

$$(3.3) \quad h_{max} = 24.34mm$$

Por la potencia del láser, la distancia de focal de la lente y la poca luz que pasa a través de la abertura, necesaria para el enfoque y no saturar el sensor de la cámara, influyen para que el tamaño establecido en h_{max} sea el adecuado, correspondiendo con la iluminación con los factores tomados.

En los parámetros de la cámara se tiene un tiempo de exposición de 2ms. Al aumentarlo el sensor se satura por la iluminación. Como el objeto está estático, este valor no es muy relevante en la recuperación de la fase para reconstruir su

forma. El único objetivo es tener franjas bien definidas. Para ello, solo es necesario tener una buena relación de iluminación entre ambos hologramas.

3.1.1. Cálculo de vector de sensibilidad para medición de forma.

Es importante verificar la sensibilidad del sistema con las ecuaciones 1.16, 1.17 y 1.18, con el objetivo de tener en cuenta qué tan sensible es nuestro sistema para cada uno de los ejes.

Los vectores de posición, tanto de la fuente de iluminación S , como del punto de observación O son $S(x_s, y_s, z_s) = (-179, 0, 192)mm$ y $O(x_o, y_o, z_o) = (0, 0, 324)mm$ respectivamente, Siendo el objeto el punto de referencia $P(x, y, z) = (0, 0, 0)$. El valor resultante del vector de sensibilidad para esta configuración es $(kx, ky, kz) = (-68.19, 0, 173.14)mm$, teniendo en el eje z la mayor sensibilidad.

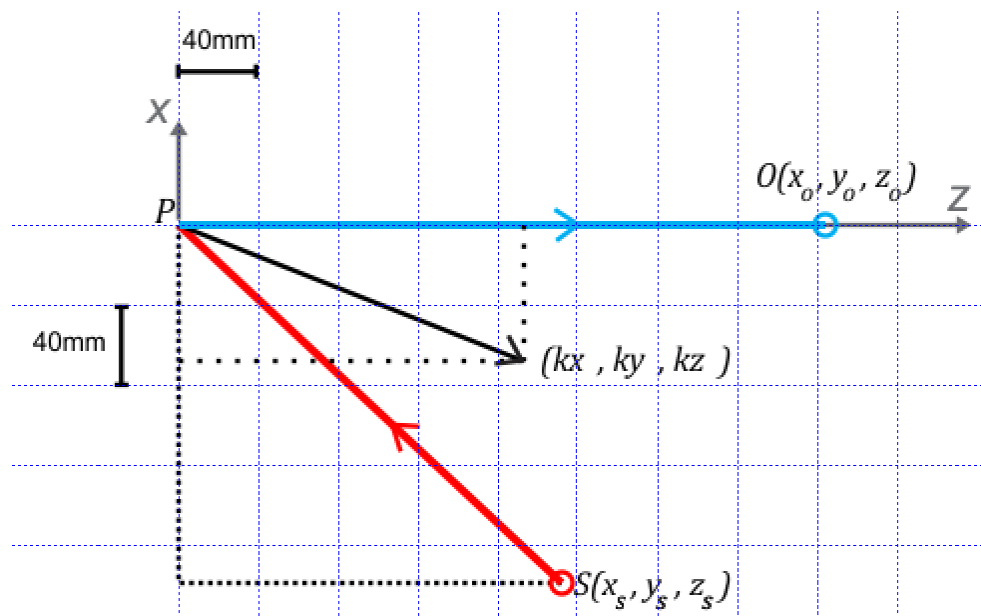


Figura 3. 2. Representación de vector de sensibilidad para determinación de forma.

La figura 3.2 nos presenta el vector de sensibilidad resultante para la determinación de forma con la configuración de un interferómetro fuera de plano.

3.1.2. Cálculo de resolución del sistema

Considerando el arreglo de la figura 3.1 y proponiendo un sistema general de vectores, tenemos la figura 3.3.

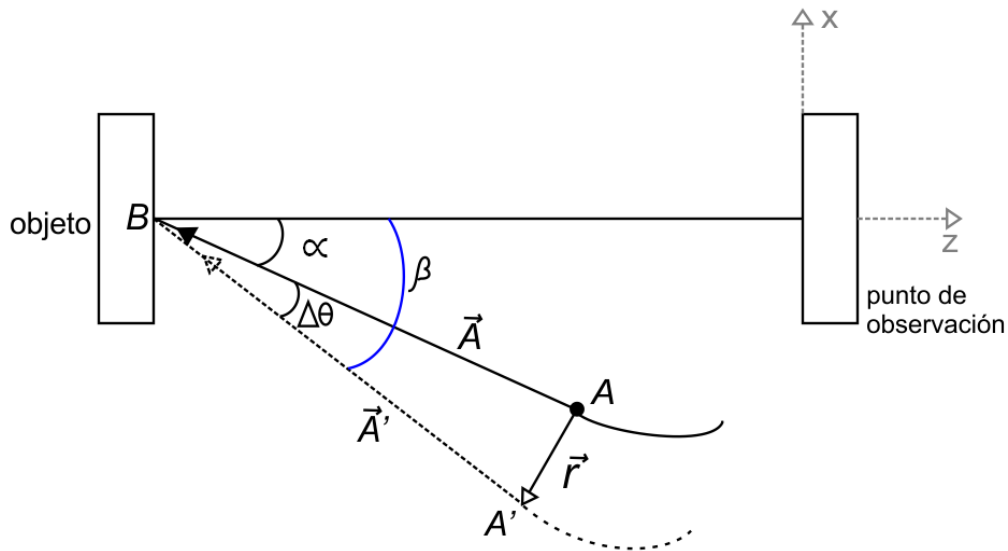


Figura 3. 3. Diagrama para la medición de la altura en la superficie usando HDI.

Donde B es un punto en el objeto; A es el punto referente al extremo de la fibra óptica (fuente de iluminación), de donde se generan los dos vectores unitarios de iluminación, con y sin inclinación por su traslado, \vec{A} y \vec{A}' respectivamente; \vec{r} es el vector de desplazamiento entre A y A'; los ángulos α, β y $\Delta\theta$, que indican la posición de la fuente de iluminación con respecto al eje z, la posición de esta misma después del traslado y la diferencia de los dos ángulos anteriores generados por los vectores unitarios de iluminación, respectivamente.

La diferencia de fase en el punto B de la superficie del objeto con respecto al punto A, producida por la inclinación está dada por el siguiente producto escalar:

$$(3.4) \quad \Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} (\vec{A}' - \vec{A}) \cdot \vec{r}$$

De aquí se componen dos triángulos:

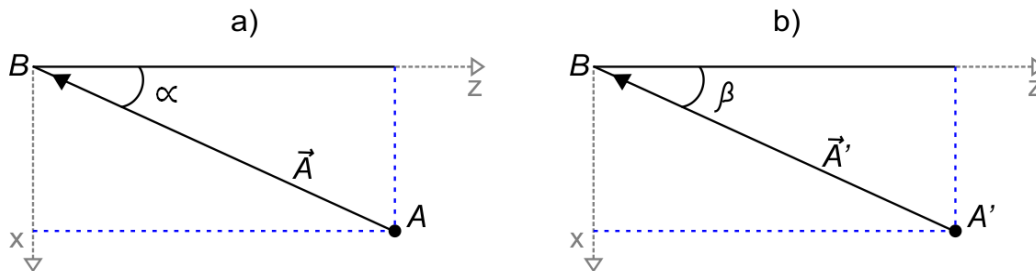


Figura 3. 4. Componentes (x, z) para a) vector unitario \vec{A} y para b) vector unitario \vec{A}'

Para el triángulo 3.4(a) tenemos el valor del vector \vec{A} como:

$$(3.5) \quad \vec{A} = (x_A - x_B, z_A - z_B)$$

Para obtener el valor de $(x_A - x_B)$ se tiene:

$$(3.6) \quad |\vec{A}| \sin \alpha = (x_A - x_B)$$

Se realiza lo mismo para $(z_A - z_B)$

$$(3.7) \quad |\vec{A}| \cos \alpha = (z_A - z_B)$$

Sustituimos estos valores en la ecuación (3.5) y al ser un vector unitario, su magnitud se iguala a uno, por lo que tenemos siguiente:

$$(3.8) \quad \vec{A} = (\sin \alpha, \cos \alpha)$$

Ahora, se realiza lo mismo para el triángulo 3.4 b).

$$(3.9) \quad \vec{A}' = (\sin \beta, \cos \beta)$$

Donde $\beta = \Delta\theta + \alpha$:

$$(3.10) \quad \vec{A}' = (\sin(\Delta\theta + \alpha), \cos(\Delta\theta + \alpha))$$

Por identidades trigonométricas y asumiendo que el ángulo de inclinación $\Delta\theta \approx 0$, la ecuación queda:

$$(3.11) \quad \vec{A}' = (\Delta\theta \cos \alpha + \sin \alpha, \cos \alpha - \Delta\theta \sin \alpha)$$

La resta de las ecuaciones (3.8) y (3.11) queda así:

$$(3.12) \quad \vec{A}' - \vec{A} = (\Delta\theta \cos \alpha, -\Delta\theta \sin \alpha)$$

En el vector \vec{r} con componentes $\vec{r} = r_1 \hat{u} + r_2 \hat{v} + r_3 \hat{w}$, tenemos que $r_1 = (x_{A'} - x_A)$ y $r_3 = (z_{A'} - z_A)$ que por lo pequeños que son con respecto a la longitud del punto A al punto B, podemos definirlos como longitudes diferenciales de sus respectivos ejes Δx y Δz respectivamente. Al no requerirse componente en y , y por no tener sensibilidad en este eje, su factor se iguala a cero. Lo que nos queda de la siguiente forma:

$$(3.13) \quad \vec{r} = (\Delta x, \Delta z)$$

Ya teniendo estos datos, sustituimos las ecuaciones (3.12) y (3.13) en la ecuación (3.4).

$$(3.14) \quad \Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} (\Delta\theta \cos \alpha, -\Delta\theta \sin \alpha) \cdot (\Delta x, \Delta z)$$

Efectuando su producto punto tenemos:

$$(3.15) \quad \Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta\theta (\Delta x \cos \alpha - \Delta z \sin \alpha)$$

Para obtener la altura del objeto, despejamos la componente Δz

$$(3.16) \quad \Delta z = \frac{\Delta\phi \lambda}{2\pi \Delta\theta \sin \alpha} - \frac{\Delta x \cos \alpha}{\sin \alpha}$$

El primer término se refiere a la fase del objeto con una inclinación generada por el ángulo α . El segundo término representa la parte lineal del sistema y al depender de la componente en x , se descarta quedando la ecuación (3.17) que nos permite calcular la altura en la dirección z del sistema:

$$(3.17) \quad \Delta z = \frac{\Delta\phi \lambda}{2\pi \Delta\theta \sin \alpha}$$

Asumiendo un cambio de fase máximo de $\Delta\phi = 2\pi$, nos permite calcular la resolución máxima de la altura en el sistema:

$$(3.18) \quad \Delta z = \frac{\lambda}{\Delta\theta \sin \alpha}$$

Para obtener el ángulo $\Delta\theta$, como se puede observar en la figura 3.3, con los datos proporcionados por la figura 3.1. La distancia que recorre la fuente de iluminación del objeto se determina a $50\mu m$ para obtener un ángulo $\Delta\theta$ que permita que la resolución máxima sea menor a la altura máxima (en el eje z) que deseamos medir.

$$(3.19) \quad \Delta\theta = \tan^{-1}\left(\frac{50 \times 10^{-6} m}{0.263 m}\right) = 0.0109^\circ = 1.9 \times 10^{-4} rad$$

Ahora introducimos los datos reales del arreglo óptico en la ecuación (3.17).
 $\lambda = 532 \times 10^{-9} m$; $\alpha = 43^\circ = 0.7505 rad$

$$(3.20) \quad \Delta z = \frac{532 \times 10^{-9} m}{1.9 \times 10^{-4} \sin(43^\circ)} = 0.0041 m$$

Este factor Δz , al ser la resolución máxima del sistema, y teniendo una menor medida que la altura máxima (en el eje z) del objeto de prueba, indica que el sistema es adecuado para obtener la forma de la superficie.

3.2. Descripción de arreglo óptico para determinar deformación

El equipo requerido para esta medición es:

- Láser DPSS Cobolt Samba de 500mW con $\lambda=532nm$
- 2 cubos divisores de haz (uno utilizado para combinar)
- 2 objetivos de microscopio

- 2 fibras ópticas monomodales
- 1 cámara PCO.Pixelfly USB
- 1 lente convergente $f=4\text{cm}$
- 1 abertura óptica
- Motor a pasos con montura rotatoria
- Objeto metálico cilíndrico para medición
- Osciloscopio
- Generado de funciones
- Buzzer (utilizado con bocina)

Para adquirir la información de deformaciones del objeto en medición, se requirió del mismo diagrama de la figura 3.1, aunque con unas modificaciones.

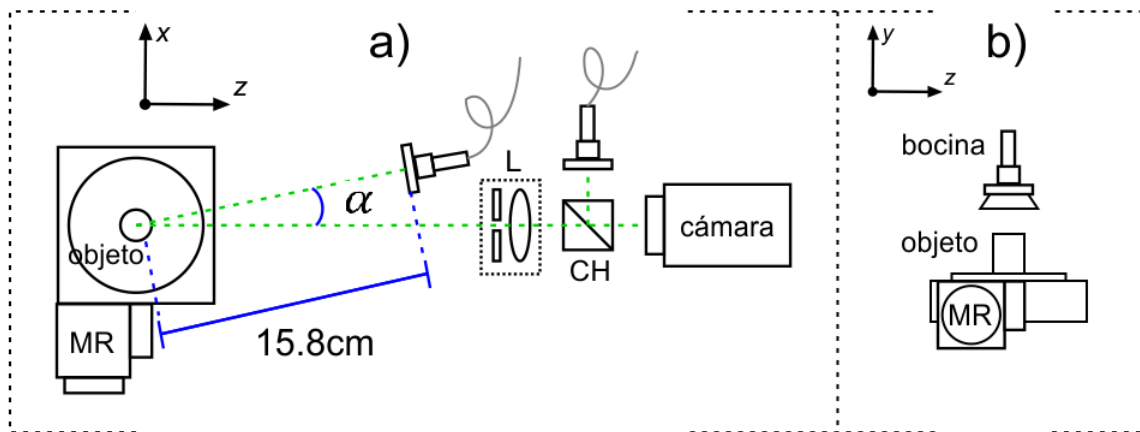


Figura 3. 5. Arreglo óptico para obtener deformaciones por vibración a) vista superior; b) vista lateral.

Como se puede observar en la figura 3.5(a), tenemos el motor con su montura de rotación (MR), la fuente de iluminación del objeto y el haz de referencia, la lente convergente (L) y su abertura, el cubo combinador de haces (CH) y la cámara CCD.

En la figura 3.5(b) se observa la posición de la bocina con respecto al objeto y a la

MR. La bocina se situó en el centro del objeto, en la parte superior de éste. Así las ondas de sonido se dispersarán de manera uniforme en todas las caras del objeto.

Las modificaciones al arreglo son mínimas. Se eliminó la montura de traslación, puesto que esta configuración requiere de la interferencia de dos hologramas en tiempos diferentes. El sonido hace que el objeto vibre, originando un desplazamiento o deformación. Al ser iluminado por el haz objeto, este se refleja llevando información sobre la vibración producida por el sonido, combinándose con el haz de referencia creando así un holograma. Tiempo después se captura otro holograma y se correlacionan.

La fuente de iluminación que produce el haz objeto cambia de lugar y su ángulo θ se modifica a 18° con respecto al eje de la cámara. Esto se hace para tener un ángulo muy pequeño entre el eje óptico y la fuente de iluminación del haz objeto. Siendo un sistema con sensibilidad fuera de plano, las deformaciones cuantificadas, en términos de la longitud de onda del láser (μm) utilizado serán las del eje z , eliminando cualquier factor de los demás ejes.

3.2.1. Cálculo de vector de sensibilidad para cuantificación de deformación

El vector de posición de la fuente de iluminación en este caso es $S(x_s, y_s, z_s) = (48, 0, 150)mm$. Tanto el vector de observación como el de referencia son los mismos que para obtener la forma.

Con estos datos obtenemos que el vector de sensibilidad $(kx, ky, kz) = (30.48, 0, 195.24)mm$, con la configuración para medición de deformaciones, representado en la figura 3.6.

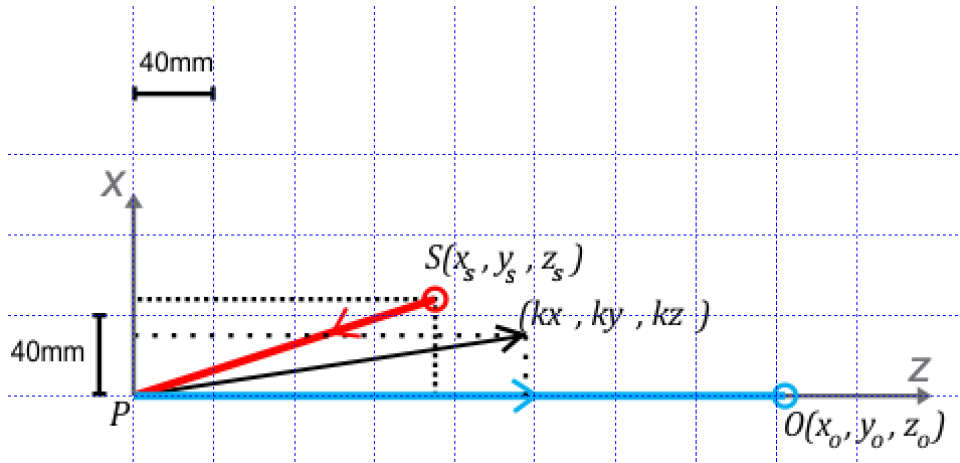


Figura 3. 6. Representación de vector de sensibilidad para determinación de deformación.

Referencias

[18] Daniel Malacara. (2004). Óptica Básica. México: Fondo de Cultura Económica.

Capítulo 4

4. RECONSTRUCCIÓN DIGITAL DEL OBJETO.

El sistema del funcionamiento general descrito en la figura 2.1, nos da la información necesaria en imágenes holográficas para que se puedan procesar conforme a los métodos señalados en el capítulo 1. En este capítulo se describen los métodos de obtención de la reconstrucción del objeto de muestra en todos sus ángulos laterales, así como la inserción de las deformaciones sufridas por las vibraciones que se generan con la bocina implementada. Los algoritmos mencionados en este capítulo se programaron en Matlab.

Para lograr este objetivo se desarrolló un algoritmo conformado por los elementos indicados en la figura 4.1.

4.1. Descripción general para la reconstrucción digital a 360°

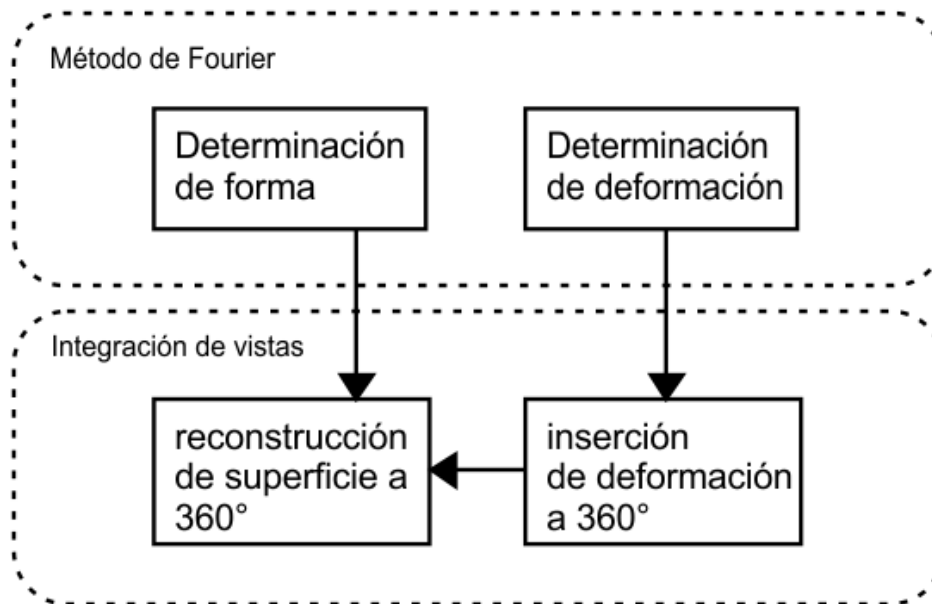


Figura 4. 1. Diagrama general para la reconstrucción del objeto e inserción de deformación a 360°.

Este diagrama se basa en dos secciones, determinadas en la figura 2.1, que son el análisis por el método de evaluación de la transformada de Fourier y la sección de integración de vistas.

Describiendo el algoritmo de manera general, se tienen dos hologramas capturados para la obtención de la forma del cilindro en posición lateral cada 45° del objeto rotados con el motor MR, habiendo que realizar 16 capturas en ocho caras del objeto para completar los 360° . Como se indica en el método utilizado en la sección 1.6.1, se requiere de un holograma de referencia y uno con una pequeña inclinación para recuperar la información de la fase producida por la sustracción de fases de los patrones de interferencia (sección 1.5). Este paso puede determinar tanto forma como deformación.

Posteriormente, los campos de fase que tienen la información de la forma son integrados (pegados) en su lugar correspondiente a 360° en una única pieza.

Para finalizar, los campos de fase que tienen la información de las deformaciones son insertados para coincidir cada uno en las caras del ángulo adecuado en la pieza reconstruida del objeto.

4.2. Análisis de fase por el método de Fourier

Para obtener las dos características buscadas en el objeto, la forma y la deformación, se realizó el método de evaluación de la Transformada de Fourier y así poder generar sus campos de fase.

La diferencia entre los tipos de información obtenidos es que para la forma se requiere de un contorneo holográfico por el método de dos puntos de iluminación

detallado en la sección 1.6.1. En cambio para la deformación, se buscan los modos de vibración del objeto por medio de la diferencia de fases de los hologramas con diferencia en el tiempo de captura y con su fuente de iluminación inmóvil. Se capturó una serie de hologramas con sonido, para después correlacionarlas obteniendo su diferencia de fase.

4.2.1. Determinación de forma

Los pasos a seguir para determinar la superficie del objeto están determinados en la figura 4.2.

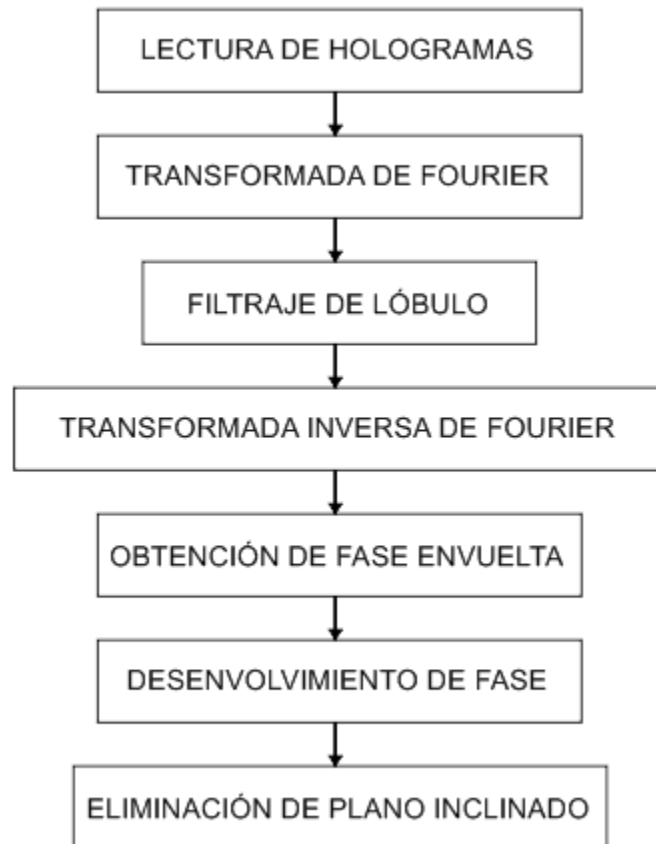


Figura 4. 2. Pasos para la obtención de fase por el método de la Transformada de Fourier.

Como se muestra en la sección 1.4, este método comienza con la intensidad de dos hologramas. Uno de referencia y otro después del cambio de posición del haz

de iluminación, que está dada por la traslación del mismo. En el algoritmo desarrollado, esto tiene lugar en la parte de la lectura de hologramas.

A continuación, en la figura 4.3 se puede observar un holograma capturado por la cámara PCO.Pixelfly USB con los programas descritos en el capítulo 2. Los patrones de difracción por polvo que se ven y todas las aberraciones que se van sumando al paso del camino óptico que toman los haces de iluminación, son eliminados con la sustracción de fases que se indica más adelante.

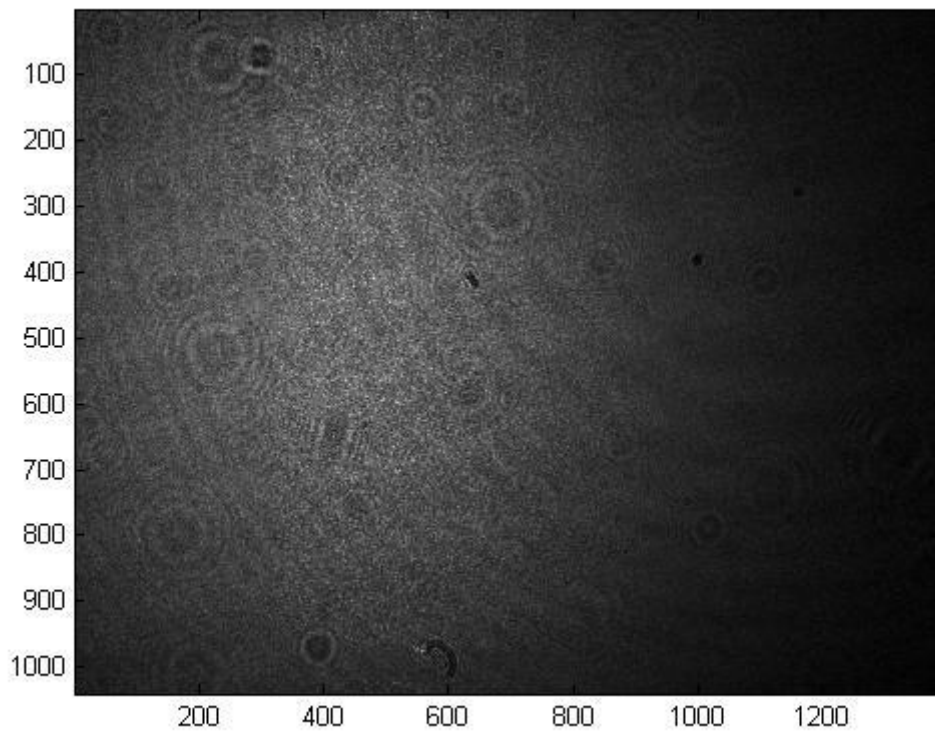


Figura 4. 3. Holograma capturado del objeto en medición.

A estas imágenes capturadas se les aplica la transformada de Fourier, para así manipularlas en el dominio frecuencial. Como se puede observar en la figura 4.4, se tienen los términos descritos en la ecuación 1.20. En la parte de en medio tenemos el término de DC, y los términos de las esquinas superior izquierda e inferior derecha son los lóbulos que contienen la información del objeto. La forma del lóbulo es determinada por la abertura (o pupila) utilizada en el arreglo óptico,

que también define la cantidad de luz que llega a la cámara. Su tamaño también se determina por lo cerrada que esté esta pupila.

Para que los lóbulos de información se encuentren alejados del término de DC y no interfieran con las mediciones, en este caso, se introduce un pequeño ángulo en el cubo combinador (Figura 3.1), o bien en el haz de referencia.

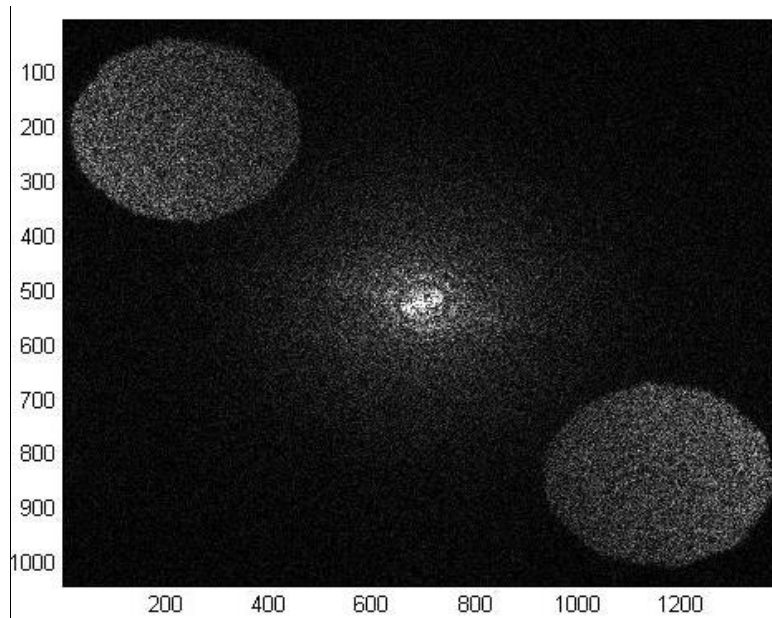


Figura 4. 4. Holograma del objeto en el dominio frecuencial.

El siguiente paso es filtrar uno de los lóbulos de información. Se enmascara toda la imagen excepto el lóbulo deseado. Al hacer esto se eliminan las frecuencias del término de DC y del otro lóbulo de información ya innecesario. Ver figura 4.5.

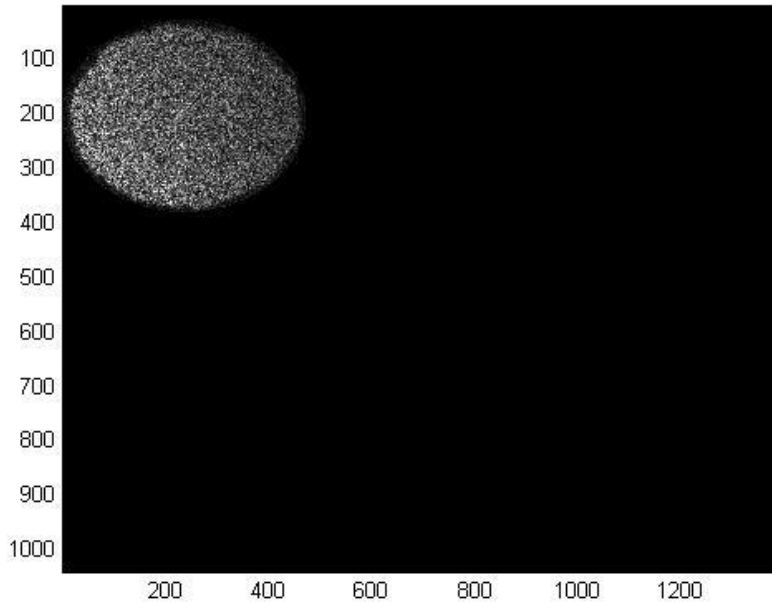


Figura 4. 5. Lóbulo de información del dominio frecuencial filtrado.

Continuando con el método, se realiza la transformada inversa de Fourier.

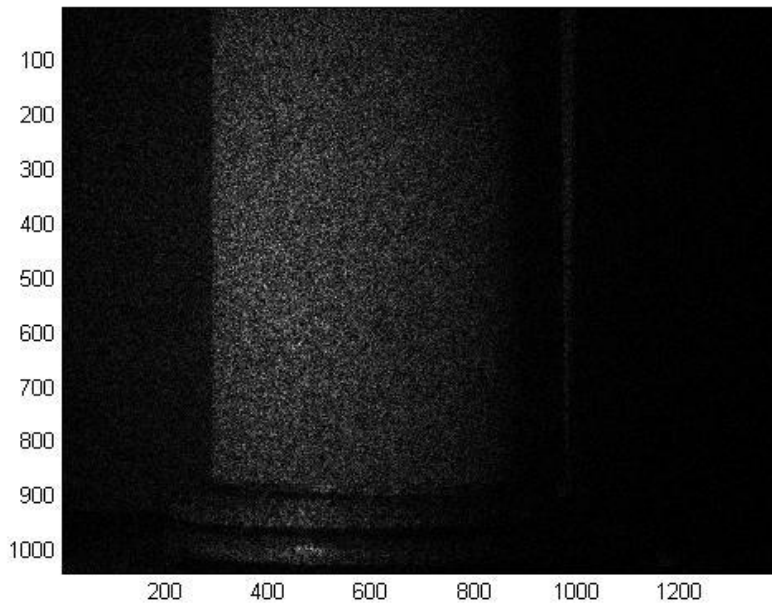


Figura 4. 6. Imagen del término de información $C(x,y)$ de la ecuación 1.20 (Transformada inversa de Fourier del lóbulo de la figura 4.5).

Cuando se tienen las dos imágenes de los hologramas de esta manera, se puede proceder a la obtención de la diferencia de fase por medio de la ecuación 1.24.

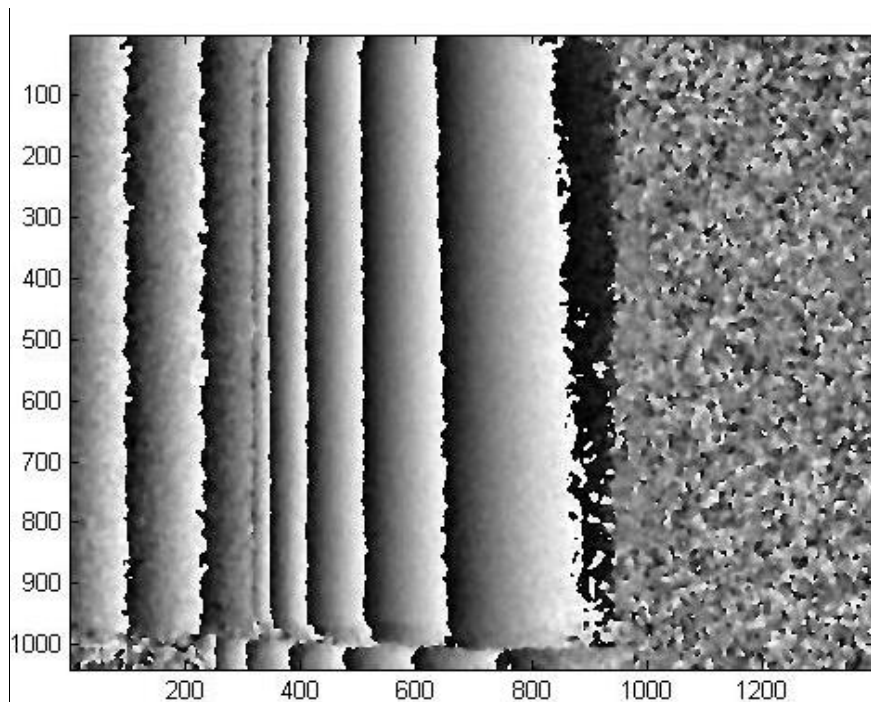


Figura 4.7. Diferencia de fase por medio de HDI. Fase envuelta del objeto en medición.

La diferencia de fase obtenida tiene la característica de que está generada por franjas de nivel, pues se requiere del ángulo de la intensidad de los hologramas procesados. Se tiene la ecuación 1.25 para la obtención de la diferencia de fase la cual entrega una fase envuelta con valores que pertenecen al rango de $\pm \pi$, producidos por la identidad arco tangente. Su forma real es adquirida al desenvolver la fase envuelta.

En la figura 4.7 se puede ver que en la parte derecha tenemos mucho ruido. Esto es por causa del ángulo del haz de iluminación con referencia a la cámara, que genera sombra y no es posible obtener una buena interferencia en los hologramas. En la parte izquierda de la imagen en la figura 4.7 se pueden ver franjas con dimensiones semejantes entre ellas (desde el pixel 0 al 300 aproximadamente en el eje horizontal), que corresponden al plano de referencia como se observa en la figura 3.1. Por eso mismo, se eliminaron los pixeles que

tienen estas características, recortando la imagen y quedándonos únicamente con las franjas de la mitad del cilindro capturado.

Las discontinuidades en el mapa de fase envuelta causadas por el enrollamiento de fase con un módulo de 2π , pueden ser removidas comparando la diferencia de fase entre los pixeles adyacentes. Si la diferencia de fase entre pixeles adyacentes es mayor a π , se suma o resta un múltiplo de 2π , desenrollando los valores envueltos de sus límites de $+\pi$ a $-\pi$. Este es el proceso de desenrollamiento de fase, utilizado para el siguiente paso.

Como se observa en la figura 4.8(a), la fase tiene una inclinación considerable, debida al ángulo de 43° creado entre la fuente de iluminación del haz objeto y el eje óptico. También tenemos la fase de un plano inclinado que tomamos como referencia para eliminar esta inclinación. Figura 4.8(b)

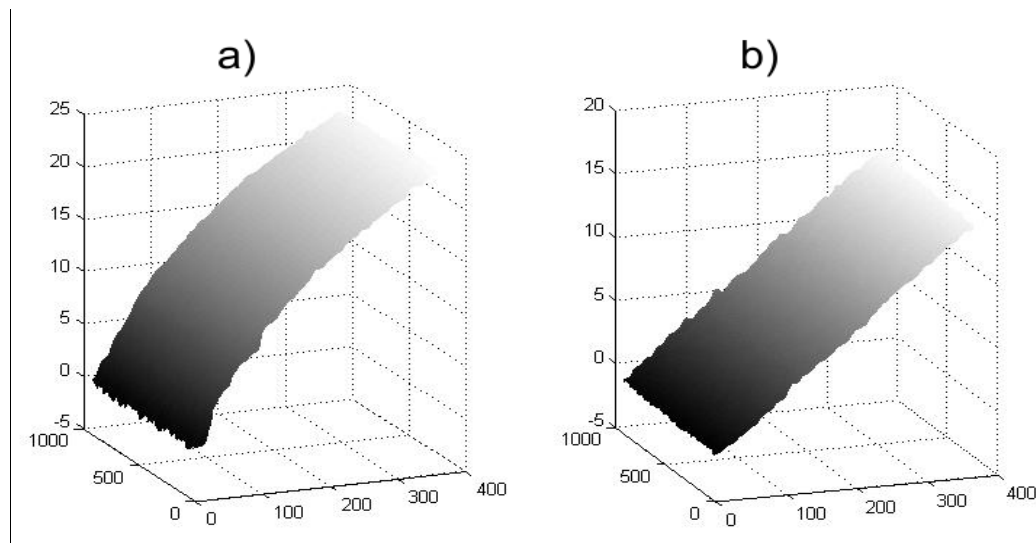


Figura 4. 8. Fase desenuelta de a) objeto en medición y de b) plano de referencia.

El último paso del algoritmo es la eliminación de esta inclinación, sustrayendo el plano de la figura 4.8(b).

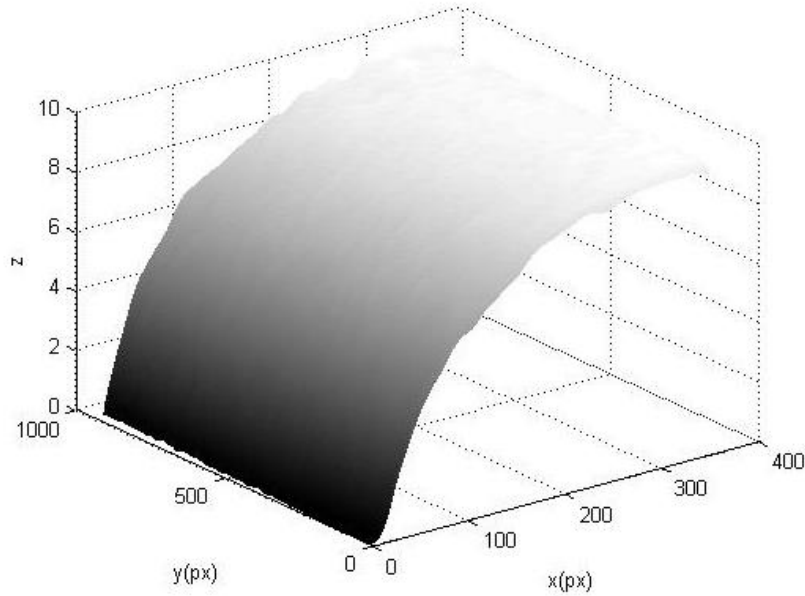


Figura 4. 9. Forma del objeto en medición. Sustracción del plano inclinado.

Para obtener las medidas reales del objeto se manipularon las matrices de cada eje por separado. Las matrices que componen los ejes x y y en la programación en Matlab se sustituyen por los datos reales medidos del objeto, cambiándolos de pixeles a milímetros. Para el eje z se requirió de la ecuación 3.17, donde se sustituye la diferencia de fase ($\Delta\phi$) por la matriz de la imagen (ΔM), que será la diferencia entre las fases desenvueltas del cilindro y del plano de referencia; y (Δz) se sustituye por (MI), que será la nueva matriz de forma del objeto.

$$(4.1) \quad MI(x, y) = \frac{\Delta M(x, y) \lambda}{2\pi \Delta\theta \sin \alpha} mm$$

Dándonos el resultado en z la medida original de objeto en la unidades de la longitud de onda. Ver figura 4.10.

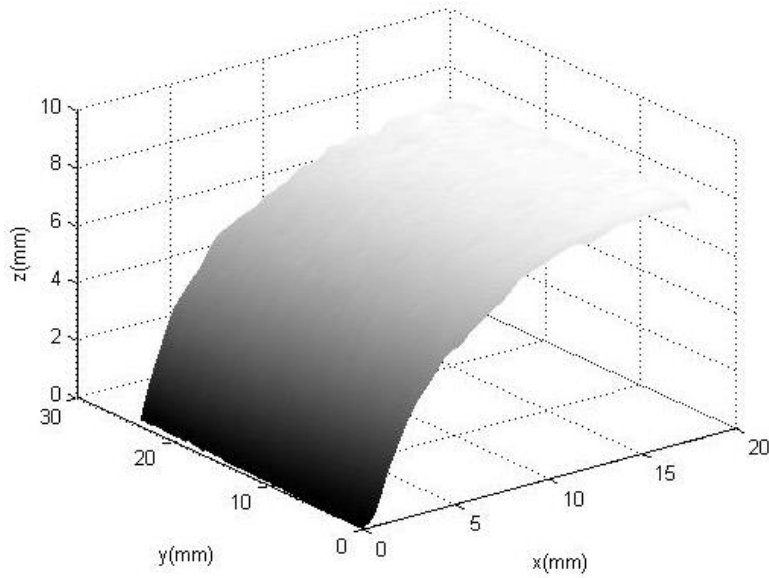


Figura 4. 10. Forma del objeto con medidas reales.

4.2.2. Determinación de deformación

La frecuencia a la que encontramos el primer modo de vibración en el cilindro es de 4.080kHz, utilizando una señal senoidal con amplitud de 5.5vpp, y un tiempo de exposición en la cámara de 70 μ s.

La diferencia de fase para esta medición se consiguió también con el método de Fourier en la figura 4.2, llegando a la fase envuelta de la figura 4.11, en donde podemos observar que en cada muestra se tienen tres lóbulos en lugares semejantes, lo cual nos indica la simetría del objeto.

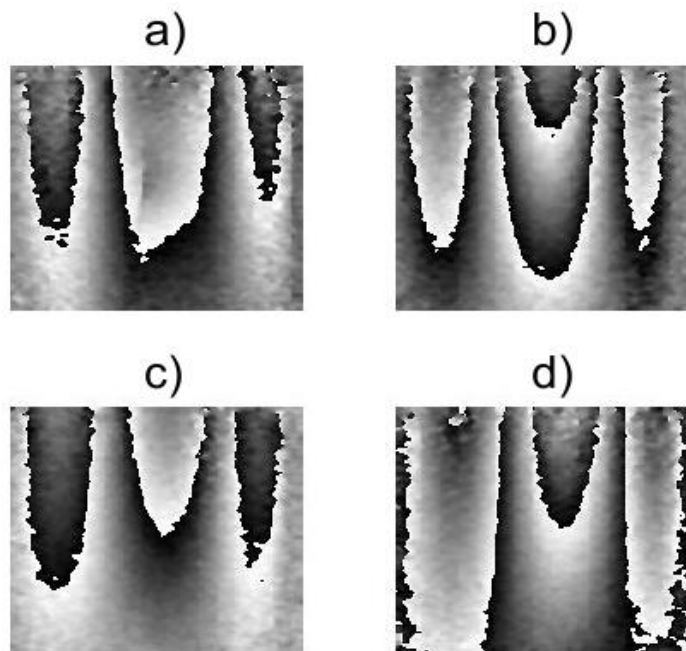


Figura 4. 11. Modos de vibración del cilindro. Fases envueltas; objeto a a) 90° , b) 180° , c) 270° y d) 360°

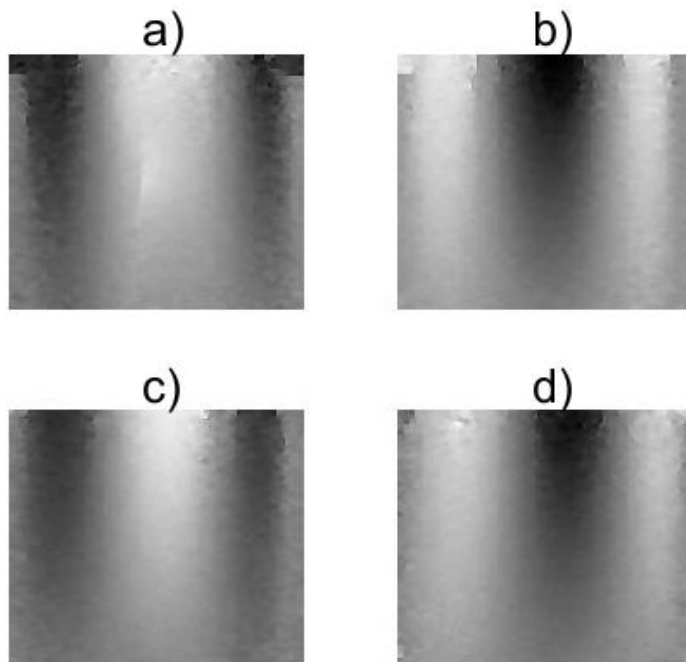


Figura 4. 12. Modos de vibración del cilindro. Fases desenvueltas; objeto a a) 90° , b) 180° , c) 270° y d) 360°

En la figura 4.12 se observan las fases desenvueltas de la figura 4.11 donde se ven los cambios en la deformación, con mayor profundidad (oscuro) y con mayor elevación (claro).

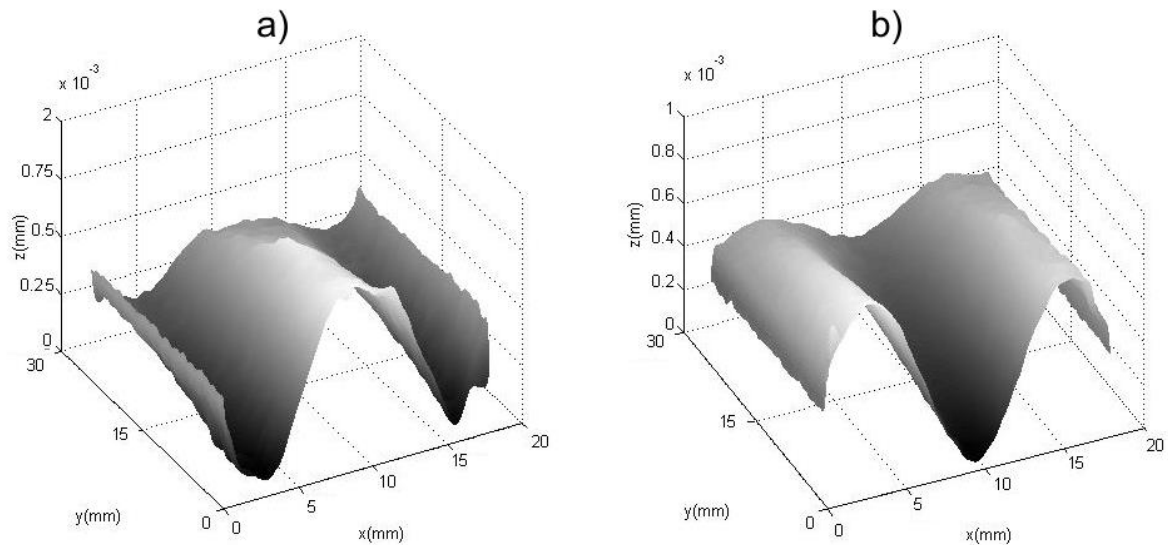


Figura 4. 13. Modos de vibración del cilindro. Fases desenvueltas, representación 3D; a) 90°, b) 180°.

En la figura 4.13 se presenta una vista tridimensional a escala de las deformaciones para dos caras distintas del cilindro. Las mediciones muestran una deformación máxima de $1.1\mu m$, con los parámetros de la señal de vibración mencionados.

4.3. Integración de vistas

En esta parte se describen los pasos a seguir para la reconstrucción digital a 360° partiendo del punto en el que ya se tienen las fases desenvueltas para cada cara. Ver figura 4.14

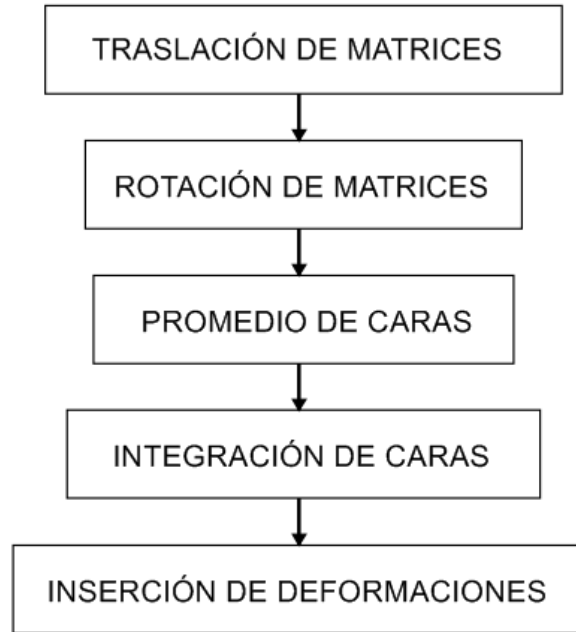


Figura 4. 14. Pasos para la reconstrucción a 360° mediante la integración de caras tridimensionales.

4.3.1. Reconstrucción de superficie a 360°

Sabiendo que el radio del cilindro es de $r_{cilindro} = 8.75 \text{ mm}$, se realiza una traslación con una matriz

$$(4.1) \quad MT = \begin{pmatrix} -8.75 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} mm$$

Las matrices MI_n de las imágenes, donde $n = 1,2,3 \dots 8.$, se suma a esta matriz. Esto se hace con el propósito de obtener su eje de rotación como se puede observar en la figura 4.15.

$$(4.2) \quad Mit_n = MT \begin{pmatrix} -8.75 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + MI_n \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$$

Donde Mit_n es la matriz de cada cara trasladada a su nueva posición.

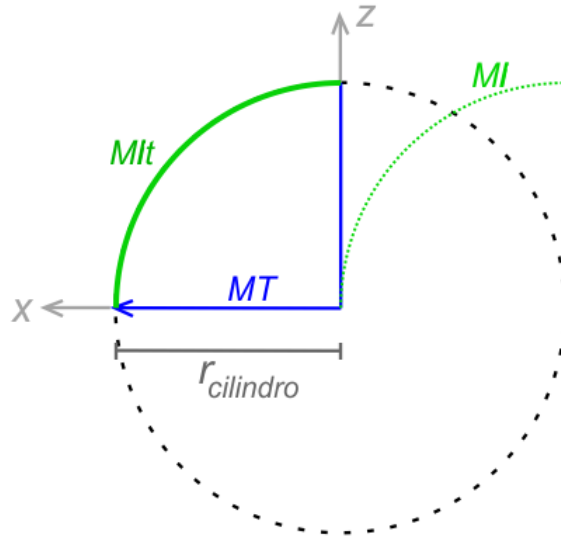


Figura 4.15. Traslación de matrices en el plano (x, z) .

Posteriormente se realiza la rotación de las imágenes. El eje de rotación es normal al plano (x, z) y se procesará a un ángulo γ en múltiplos de 45° como se ve en la figura 4.16. Para esto se tiene la siguiente matriz de rotación (Mr):

$$(4.3) \quad Mr_n = \begin{pmatrix} \cos(n\gamma) & 0 & -\text{sen}(n\gamma) \\ 0 & 1 & 0 \\ \text{sen}(n\gamma) & 0 & \cos(n\gamma) \end{pmatrix}$$

Las matrices rotadas MIr_n pueden ser expresadas de la siguiente forma:

$$(4.4) \quad MIr_n = MI t_n * Mr_n$$

$$(4.5) \quad MIr_n = MI t_n \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} * Mr_n \begin{pmatrix} \cos(n\gamma) & 0 & -\text{sen}(n\gamma) \\ 0 & 1 & 0 \\ \text{sen}(n\gamma) & 0 & \cos(n\gamma) \end{pmatrix}$$

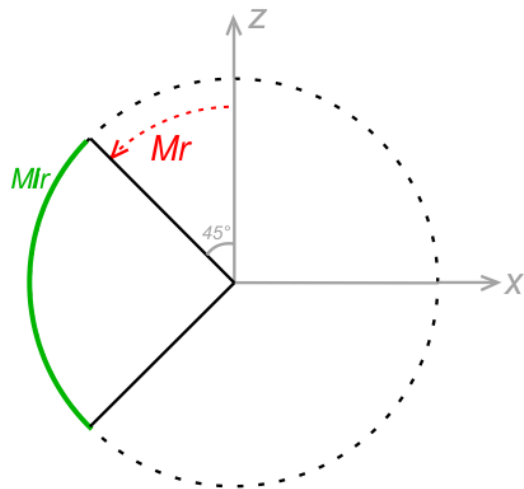


Figura 4. 16. Rotación de las matrices con una nueva posición.

La operación consiste en realizar una multiplicación de dos matrices de diferentes dimensiones, por lo tanto se crean matrices auxiliares con los valores de MIT_n , de las mismas dimensiones que la de rotación (3×3), para cada uno de sus ejes (x, y, z). Se procesa la rotación y después se vuelven a componer en una sola matriz con las dimensiones anteriores a la multiplicación.

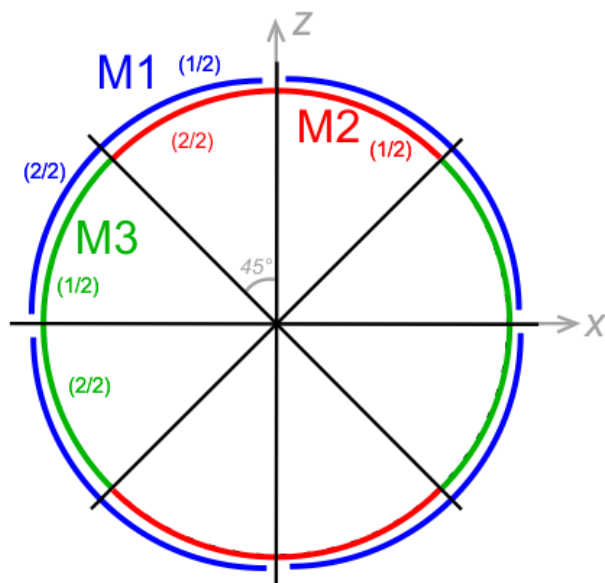


Figura 4. 17. Matrices acomodadas cada 45° .

En la figura 4.17 se pueden observar todas las caras acomodadas en su posición. El siguiente paso es realizar un promedio de caras. Esto consiste en integrar en una nueva matriz total M_{total} la mitad de una cara con la mitad de la cara consecutiva. Como ejemplo tenemos una matriz $M1$, con un ángulo de 0° , $M2$ con -45° de rotación con respecto a $M1$, y $M3$ con un ángulo de rotación de 45° . Estas matrices se dividen a la mitad y se promedian de la siguiente forma:

$$(4.6) \quad M_{total_{1/8}} = (M1_{1/2} + M2_{2/2}) / 2$$

$$(4.7) \quad M_{total_{2/8}} = (M1_{2/2} + M3_{1/2}) / 2$$

Y continúa con ese proceso hasta obtener las ocho partes promediadas del cilindro, integradas en M_{total} .

4.3.2. Inserción de deformación a 360°

Se crea una matriz $Mf(mx, y)$ donde m es el número de imágenes con deformación; (x, y) indican las dimensiones de las columnas y renglones del cilindro, respectivamente. Al no sincronizar la captura de imágenes con las vibraciones de sonido que deforma al objeto y teniendo para cada captura y cada cara, distintos tiempos en la señal de deformación, no es posible seguir el mismo proceso que se sigue para la forma en cuanto a la suma de las mitades en cada imagen.

Las imágenes con deformación se recortan y se juntan en Mf teniendo todas las perspectivas del cilindro. Posteriormente se agregan a la gráfica en 360° de la forma.

Matemáticamente, la inserción de la deformación en la forma reconstruida del objeto se basa en la ecuación (1.5) donde el vector de sensibilidad contiene los términos de los vectores de observación $\hat{r}_o(x_o, y_o, z_o)$ y de la fuente de iluminación

del objeto $\hat{r}_s(x_s, y_s, z_s)$. Por su parte, las ecuaciones (1.14) y (1.15) se refieren a dichos vectores, respectivamente. Estos tienen información de cada punto (x, y, z) en el objeto. De aquí se relacionan la forma y las deformaciones.

En cuanto a programación, Matlab tiene la función *mesh*, con los parámetros de entrada (X, Y, Z, C) que permite graficar mallados en tres dimensiones (x, y, z) . En este caso, todos sus parámetros son matrices con las mismas dimensiones (i, j) . La matriz de color $C(i, j)$, corresponde a las deformaciones sufridas por las vibraciones de sonido, y está localizada en los puntos $X(i, j)$, $Y(i, j)$, $Z(i, j)$, que serán las matrices $Mtotal(x, y, z)$ de cada eje para la forma del objeto.

Capítulo 5

5. RESULTADOS.

En este capítulo se mostrarán los resultados obtenidos en dos cilindros metálicos (uno liso y otro con escalón), utilizando la reconstrucción en 360° programada en Matlab que se describió en el capítulo anterior. Se obtuvieron resultados para la forma de la superficie de cada uno de los objetos de muestra, además de representar en un mapa de colores las deformaciones por vibraciones de sonido en el cilindro liso de aluminio. Estas deformaciones se observan para el eje óptico.

5.1. Resultados del cilindro liso de aluminio.

Se determinó la forma del cilindro para todas las caras por separado. Posteriormente se reconstruyó la superficie completa siguiendo los algoritmos de la figura 4.12, la cual también determina la inserción de las deformaciones.

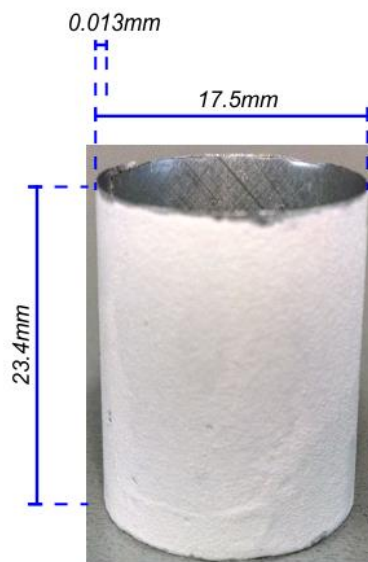


Figura 5. 1. Cilindro metálico liso. Medidas.

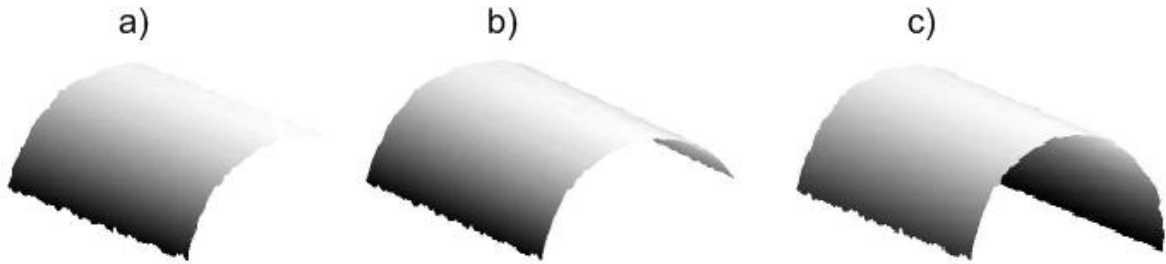


Figura 5. 2. Superposición de las caras en diferentes ángulos, a) una cara a 315°; b) dos caras superpuestas a 315° y 0°; c) tres caras superpuestas a 315°, 0° y 45°.

La figura 5.2 muestra ejemplos de las posiciones de tres caras de las ocho utilizadas en total en sus ángulos correspondientes, para promediar estas matrices de la forma del cilindro.

La figura 5.3 representa la forma del cilindro liso de aluminio reconstruida a 360°.

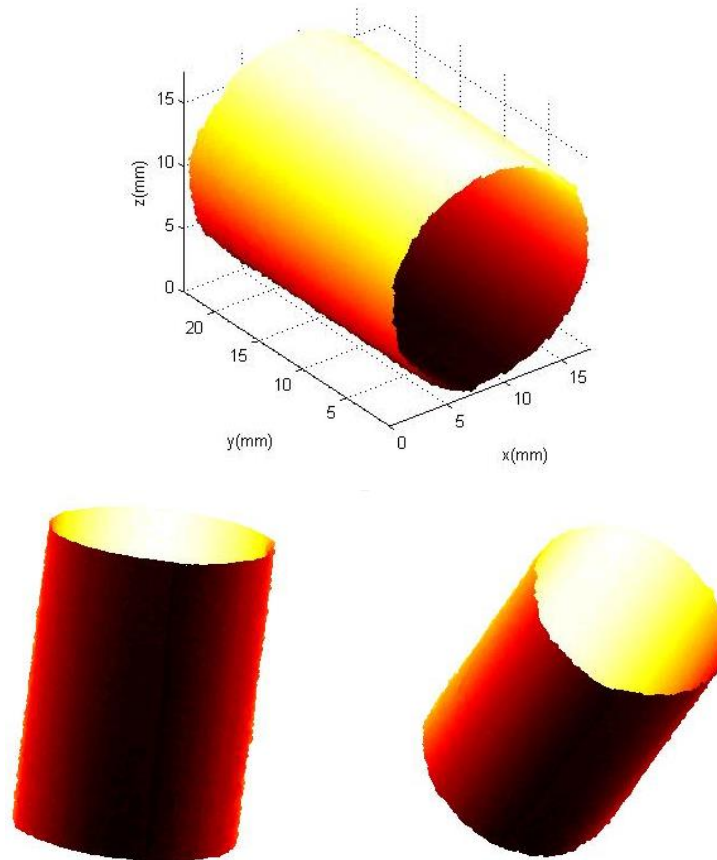


Figura 5. 3. Resultado de la reconstrucción en 360° del cilindro de muestra

En la figura 5.4 se presenta la reconstrucción completa del cilindro liso de aluminio representando con colores sus deformaciones.

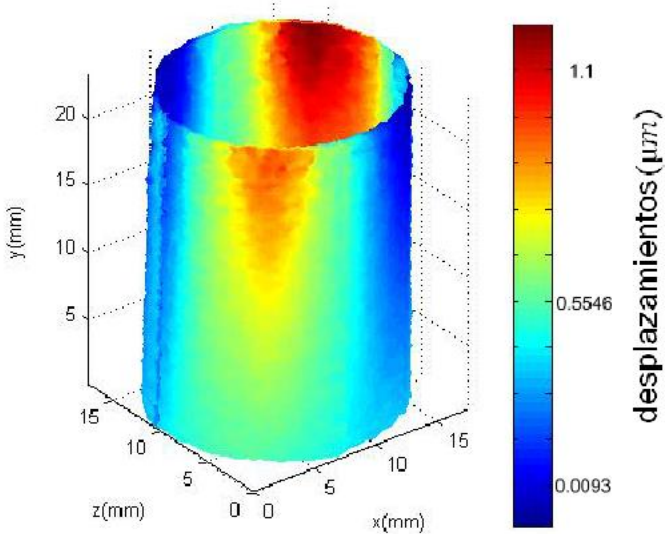


Figura 5. 4. Resultado de la reconstrucción en 360° del cilindro de muestra, con inserción de sus deformaciones.

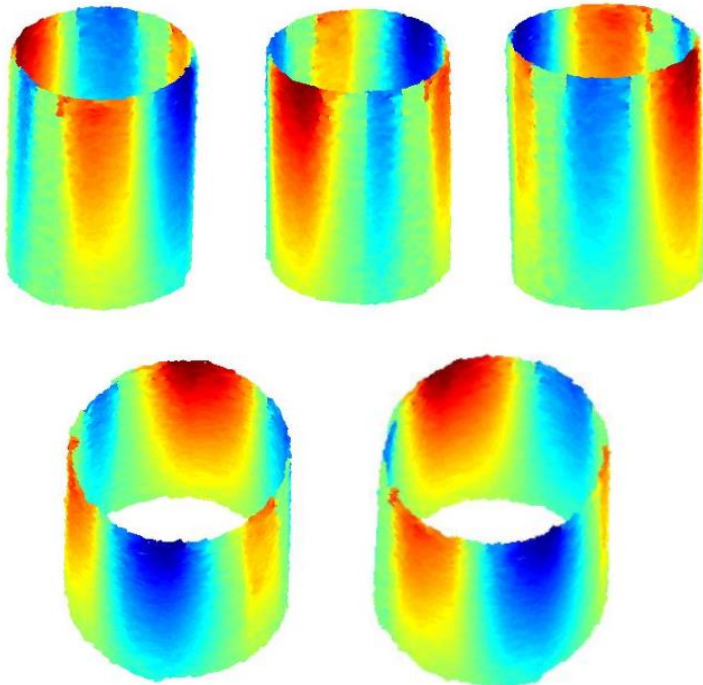


Figura 5. 5. Resultados de forma y deformación en distintos ángulos y posiciones.

Los modos de vibración obtenidos experimentalmente con una señal de sonido senoidal cuyos parámetros de frecuencia son de 4.080kHz y amplitud de 5.5vpp, expuestos en las figuras 5.4 y 5.5, se compararon en el software CAD *SolidWorks*, el cual arroja los resultados modales de la figura 5.6, dándonos una frecuencia de 6.066kHz, siendo factores de diferencia la sujeción del cilindro, así como la vibración, que en simulación estos dos factores son exactos y no son generados de algún punto en específico, además la diferencia en las propiedades del material (aluminio) y la fabricación del cilindro genera una pequeña discrepancia entre la frecuencia de los modos de vibración reales y simulados.

Comparando las figuras 5.5 y 5.6, se puede apreciar la semejanza de los modos de vibración compuestos de seis lóbulos alrededor del objeto, coincidiendo los de la simulación (Fig. 5.6) con los modos experimentales (Fig. 5.5)

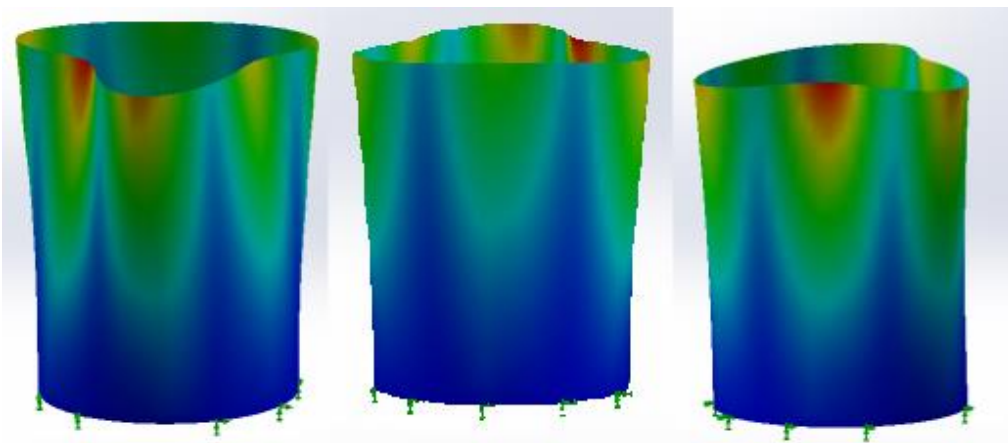


Figura 5. 6. Simulación de modos de vibración en SolidWorks.

5.2. Resultados del cilindro con escalón.

Para la muestra cilíndrica con escalón se expuso a mediciones únicamente de forma. Este cilindro de aluminio se puede ver en la figura 5.7 donde tenemos una altura de 25.7mm, un diámetro mínimo $d = 16mm$ y uno diámetro máximo de

$D = 19mm$. El escalón entonces tendrá una medida real de $1.5mm$.

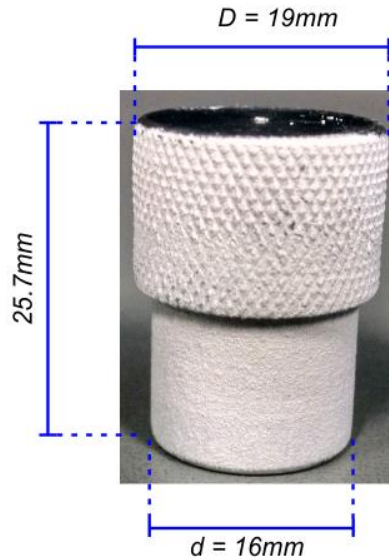


Figura 5. 7. Cilindro metálico escalonado

Haciendo referencia a la figura 3.3, la traslación en la fuente de iluminación hacia el objeto es de $50\mu m$ para tomar el holograma con este desplazamiento, lo que nos da una inclinación de 0.0109° en el haz objeto. Ver figuras 5.8(a) y 5.9(a). Con este dato, la medida del escalón es de $1.78mm$.

Se realizaron capturas del mismo cilindro escalonado, ahora con una traslación de $75\mu m$. Ver figuras 5.8 (b) y 5.9 (b) Tomando la ecuación (3.3) obtenemos el ángulo de inclinación de $\Delta\theta = 2.85 \times 10^{-4} rad$ y conociendo los demás datos para la ecuación (3.20) tenemos una resolución máxima de la altura en el eje óptico de:

$$(5.1) \quad \Delta z = \frac{532 \times 10^{-9} m}{2.85 \times 10^{-4} \sin(43^\circ)} = 0.0027 m$$

La medida del escalón en este caso es de $1.43mm$.

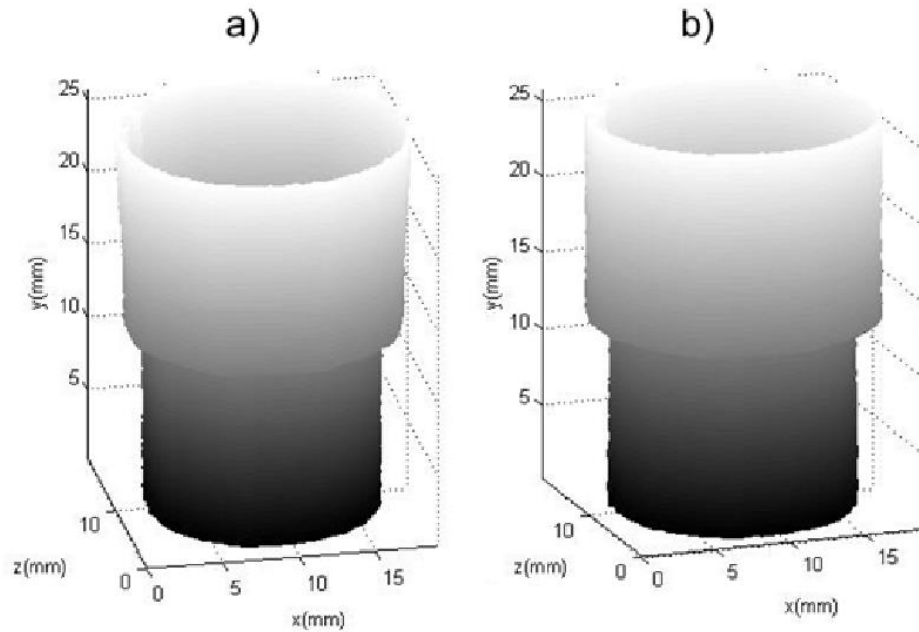


Figura 5. 8. Resultado de la reconstrucción en 360° del cilindro escalonado. Inclinación en MT de a) 50 μ m, b) 75 μ m.

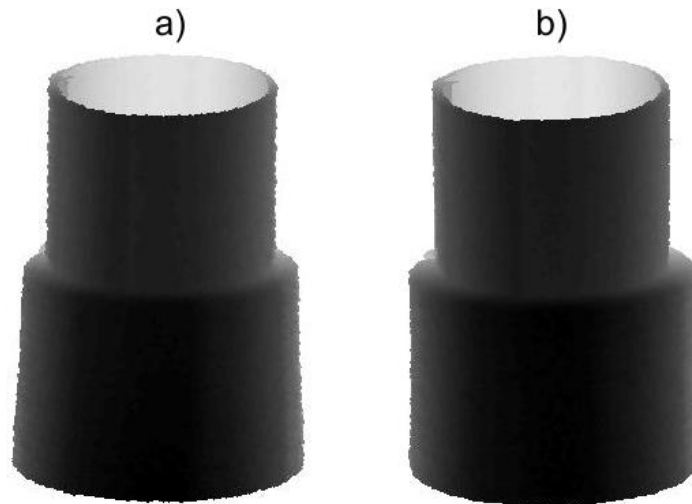


Figura 5. 9. Resultados de forma del cilindro escalonado. Inclinación en MT de (a) 50 μ m, (b) 75 μ m.

Para obtener el error (e) de cada una de las medidas del escalón con respecto a la medida real tenemos la siguiente ecuación:

$$(5.2) \quad e = \frac{|valor\ HDI - valor\ real|}{|valor\ real|} * 100 \%$$

En la siguiente tabla podemos observar las diferencias que existen entre las reconstrucciones del mismo objeto con diferente resolución (Δz)

Inclinación (μm)	Ángulo de inclinación $\Delta\theta$ (<i>rad</i>)	Angulo de inclinación $\Delta\theta$ ($^{\circ}$)	Resolución Δz (<i>mm</i>)	Escalón (<i>mm</i>)	Error <i>e</i> (%)
50	1.9×10^{-4}	0.0109	4.1	1.76	17.33
75	2.85×10^{-4}	0.0163	2.7	1.43	4.67

Figura 5. 10. Tabla de diferencias en mediciones con respecto a la resolución máxima del sistema para un interferómetro fuera de plano.

De esto podemos ver que una menor resolución en la altura Δz influye en un mejor resultado, entonces, al aumentar este factor la reconstrucción de los detalles tendrá un decremento.

Capítulo 6

6. CONCLUSIONES Y TRABAJO A FUTURO.

6.1. Conclusiones

Esta tesis presenta el proceso para la reconstrucción digital en tres dimensiones a 360° de objetos de revolución para una comprensión y medición de su forma y de su deformación aplicándole una vibración de sonido de manera uniforme. La ventaja de este sistema óptico es que puede servir para la medición tanto de forma en la superficie de objetos como para la deformación o desplazamientos, aplicándole únicamente un cambio en la posición del extremo de la fibra óptica que ilumina al objeto.

El resultado obtenido se debe al desarrollo de varias técnicas en las diferentes etapas del proyecto utilizando la técnica de holografía digital interferométrica, la cual nos permitió tener la visibilidad del objeto en campo completo. En la etapa inicial de este trabajo de tesis se inició con el control mecatrónico de las variables físicas como son el tiempo y la cantidad de imágenes a capturar de la cámara utilizada, así como del control del movimiento del objeto y la fuente de iluminación a una escala de micrómetros.

El procesamiento de las imágenes se generó con el método de evaluación de la transformada de Fourier para obtener la fase, que fue posible gracias a que utilizamos un sistema de enfoque que consta de una abertura y una lente convergente. Este método fue de mucha utilidad sobre todo en las pruebas para separar los lóbulos y el término de DC al pasar al dominio frecuencial los hologramas, permitiéndonos observar tanto los lóbulos frecuenciales como las franjas de interferencia en tiempo real.

Para la reconstrucción de la forma, la sustracción de la fase del término lineal de inclinación a la fase del objeto se considera un éxito por el hecho de reproducir la forma correctamente sustituyendo el término mencionado por el plano (físico) inclinado en la ecuación (3.16).

La inserción de las deformaciones en la matriz completa del objeto reconstruido en 360° es relativamente sencilla habiendo realizado un procesamiento digital por las funciones que Matlab otorga a los programadores.

Al utilizar objetos con simetría en todas sus caras, resulta fácil el promedio que se realizó por la mitad de cada una de sus caras, no obstante, al tener un objeto no simétrico, resulta un poco más difícil realizar este paso, por lo que se puede optar por dejarlo como trabajo futuro, aunque teóricamente tendría que funcionar de la misma manera.

En la reconstrucción a 360° se manipula la fase resultante de cada eje por separado, lo que nos permitió realizar operaciones de matrices como la rotación y la traslación de éstas. Al ser las muestras objetos de revolución, nos posibilita su acomodo matricial de esta manera, casi automático.

Con los resultados alcanzados, empleando los parámetros experimentales del sistema y tomando en cuenta las resoluciones obtenidas con la ecuación (3.20), se hace factible la aplicación industrial para evaluar la forma y deformación de componentes de maquinaria o de producción en una fábrica. La figura 5.10 menciona las diferencias que se tienen con respecto al cambio de resolución, por lo que es posible modificar estos parámetros con el fin de obtener mejores resultados o para implementarlos en componentes específicos, dependiendo de las dimensiones y la forma del objeto.

6.2. Trabajo a futuro.

Dentro del desarrollo de este proyecto se observaron algunos aspectos que podrían ser optimizados:

- Crear un sistema de sincronización en la captura de las imágenes con respecto a la generación de las ondas.
- Obtener mediciones de un mayor número de muestras tanto cilíndricas como no cilíndricas, pasando por objetos totalmente irregulares.
- Crear un sistema de enfoque automático para obtener mediciones con un rango más amplio de alturas en las muestras.
- Optimizar la automatización del procesamiento de las imágenes. Para detectar los lóbulos de información en el dominio frecuencial.