

IMPLEMENTACIÓN DE UN MICROSCOPIO PERFILOMÉTRICO POR INTERFEROMETRÍA ÓPTICA

JUAN ALBERTO SÁNCHEZ DAZA



**PROGRAMA DE MAESTRÍA EN FÍSICA
DEPARTAMENTO DE FÍSICA Y GEOLOGÍA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS
UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
PAMPLONA, 2018**

**IMPLEMENTACIÓN DE UN MICROSCOPIO PERFILOMÉTRICO POR
INTERFEROMETRÍA ÓPTICA.**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de
MAGISTER EN FÍSICA**

JUAN ALBERTO SÁNCHEZ DAZA

Directores:

Dr. NESTOR ALONSO ARIAS HERNANDEZ Dra. MARTHA LUCIA MOLINA PRADO



Grupo Óptica Moderna



**PROGRAMA DE MAESTRÍA EN FÍSICA
DEPARTAMENTO DE FÍSICA Y GEOLOGÍA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS
UNIVERSIDAD DE PAMPLONA**

Pamplona, 2018

Dedicatoria.

*A mis abuelos, Cecilia y Luis, por ser el pilar fundamental en todo lo que soy, por tolerarme, guiarme y dedicar su vida a la familia, por su incondicional apoyo perfectamente mantenido a través del tiempo.
Todo este trabajo ha sido posible gracias a ellos.*

Agradecimientos

La universidad me dio la bienvenida al mundo como tal, las oportunidades que me ha brindado son incomparables, y antes de todo esto ni pensaba que fuera posible que algún día si quiera me encontrara con una de ellas. Agradezco mucho por la ayuda de mis maestros, mis compañeros, y a la universidad de Pamplona por su apoyo económico en el descuento de la matrícula y con todos los copiosos conocimientos que me ha otorgado, la institución que me abrió sus puertas desde el pregrado, que me dio la oportunidad de desempeñarme como profesional y seguir mi formación académica con este postgrado. También estoy muy agradecido el cuerpo docente del departamento de física, especialmente con el Dr. Néstor Alonso Arias Hernández y la Dra. Martha Lucía Molina Prado, quienes fue mis tutores desde el pregrado, quienes me han apoyado siempre y han puesto su confianza en mí para sacar adelante este trabajo. A mis compañeros, mis amigos de estudio y trabajo. Quiero agradecer también a mi familia, mi mamá, mi papá y demás que siempre han creído en mí, de una u otra manera me han ayudado a avanzar cuando más lo necesité. Finalmente, quiero agradecer a la persona que estuvo gran parte del desarrollo de mi maestría, Alexandra Bohórquez, estuviste conmigo en los buenos y malos momentos, gracias por la paciencia y por motivarme a seguir adelante, por comprenderme en los momentos de estrés y mal humor, gracias porque estuviste conmigo.

Juan Alberto Sanchez Daza
Pamplona, 28 de septiembre de 2018

Implementación de un microscopio perfilométrico por interferometría óptica

RESUMEN

La microscopía interferométrica es una técnica muy conocida en el estudio de topografías de objetos del orden nanométrico. En este trabajo se presenta el diseño y construcción de un microscopio perfilométrico por interferometría de luz policromática y por interferometría de luz cuasi-monocromática, que permite el levantamiento topográfico de objetos con resolución nanométrica. El sistema está compuesto por un objetivo interferométrico tipo Mirau de 10X, una cámara digital tipo CMOS, un sistema de traslación piezoeléctrico con resolución de 0.1nm y un sistema de iluminación de luz blanca tipo LED y para la adaptación del dispositivo a luz cuasi-monocromática, se usa un filtro pasa banda de 647nm. Para luz policromática, por medio de un escaneo axial del objeto, se adquiere un conjunto de imágenes con franjas interferométricas deformadas las cuales dan información de la rugosidad del objeto. El principio del sistema está basado en la localización del pico de coherencia en cada posición $I_m(i,j)$ del conjunto de m imágenes adquiridas, en donde la posición $z(m)$ del pico de coherencia cambia de acuerdo a la topografía del objeto. Para calcular el pico de coherencia se implementan varios algoritmos como son: el cálculo del mínimo del interferograma $\min\{I_m(i,j)\}$, el cálculo del máximo de la envolvente y la localización del centro de interferograma mediante el análisis de la fase por transformada de Fourier. Cuando se adapta el filtro pasa banda, la fuente puede ser considerada una fuente cuasi-monocromática, para este caso se implementan las técnicas de *Phased Shifting* a 3 y 4 imágenes, lo que reduce considerablemente el número de imágenes a adquirir, por lo tanto, el costo computacional. Se presenta una serie de reconstrucciones tridimensionales de varios objetos a resolución nanométrica, obtenidas de manera automática con la ayuda de una interface gráfica elaborada en *Matlab*, que permite el control de los dispositivos, procesado digital de las imágenes y el cálculo de la topografía del objeto.

Palabras clave: Interferometría de luz blanca, Mirau, Sistema interferómetro Vertical, *Phase Shifting*

Implementation of a profilometric microscope by optical interferometry

ABSTRACT

Interferometric microscopy is a well-known technique in the study of topographies of objects. In this work the design and construction of a profilometric microscope by polychromatic light interferometry and by quasi-monochromatic light interferometry, which allows the topographic survey of objects with nanometric resolution, is presented. The system consists of a 10X Mirau interferometric lens, a CMOS-type digital camera, a piezoelectric translation system with a resolution of 0.1nm and a white LED lighting system and for the adaptation of the device to quasi-monochromatic light, a 647nm band pass filter is used. For polychromatic light, by means of an axial scan of the object, a set of images is acquired with a system of distorted interferometric strips which give information about the roughness of the object. The principle of the system is based on the location of the coherence peak in each position $I_m(i, j)$ of the set of m acquired images, where the $z(m)$ position of the coherence peak changes according to the topography of the object. To calculate the coherence peak, several algorithms are implemented, such as the calculation of the minimum interferogram minimum $\{I_m(i, j)\}$, the calculation of the maximum of the envelope and the location of the interferogram center by analyzing the phase by Fourier transform. When the band pass filter is adapted, the source can be considered a quasi-monochromatic source, for this case the techniques of *Phased Shifting* to 3 and 4 images are implemented, which considerably reduces the number of images to acquire, therefore the cost computational. It presents a series of three-dimensional reconstructions of several objects at nanometric resolution, obtained automatically with the help of a graphical interface developed in *Matlab*, which allows the control of the devices, digital processing of the images and the calculation of the topography of the object.

Keys words: White light interferometry, Mirau, vertical interferometer system, *Phased Shifting*

TABLA DE CONTENIDO

| | |
|---|----|
| TABLA DE CONTENIDO..... | 5 |
| LISTA DE FIGURAS | 8 |
| <i>Capítulo 1</i> | |
| INTRODUCCIÓN | 10 |
| <i>Capítulo 2</i> | |
| PRINCIPIOS DE INTERFEROMETRÍA | 11 |
| 2.1 SUPERPOSICIÓN DE ONDAS | 12 |
| 2.2 COHERENCIA..... | 14 |
| 2.2.1 Función de Coherencia Mutua (Hariharan, 2003). | 16 |
| 2.2.2 Grado complejo de Coherencia..... | 18 |
| 2.2.3 Coherencia Espacial (Hariharan, 2003):..... | 18 |
| 2.2.4 Coherencia Temporal (Hariharan, 2003):..... | 20 |
| <i>Capítulo 3</i> | |
| INTERFEROMETRÍA CON LUZ POLICROMÁTICA | 21 |
| 3.1 MICROSCOPIO PERFILOMÉTRICO POR INTERFEROMETRÍA DE LUZ POLICROMÁTICA | 21 |
| 3.2 ANÁLISIS DE FRANJAS DE INTERFERENCIA DE LUZ POLICROMÁTICA | 22 |
| 3.2.1 Ventajas de usar una fuente de luz policromática | 25 |
| 3.3 MÉTODOS DE RECONSTRUCCIÓN IMPLEMENTADOS | 26 |
| 3.3.1 Detección de Máximos o Mínimos..... | 26 |
| 3.3.2 Máximo de la Envolvente. | 27 |
| 3.3.3 Localización de Valores de Fase..... | 27 |
| <i>Capítulo 4</i> | |
| INTERFEROMETRÍA CON LUZ CUASI- MONOCROMÁTICA..... | 30 |
| 4.1.1 Ventajas de usar luz cuasi- monocromática. | 30 |
| 4.1.2 Microscopio perfilométrico por interferometría de luz cuasi-monocromática | 30 |
| 4.2 INTERFEROMETRÍA POR PHASE SHIFTING | 31 |
| 4.3 MÉTODOS DE RECONSTRUCCIÓN IMPLEMENTADOS | 33 |
| 4.3.1 Phased Shiffting a 4 imágenes. | 33 |
| 4.3.2 Phased Shiffting a 5 imágenes. | 35 |
| 4.3.3 Phased Unwrapping | 37 |
| <i>Capítulo 5</i> | |
| IMPLEMENTACIÓN DEL MICROSCOPIO PERFILOMÉTRICO | 39 |
| 5.1 DESCRIPCIÓN DEL MONTAJE..... | 39 |
| 5.1.1 Objetivo Interferométrico..... | 40 |

| | | |
|-------------------|---|----|
| 5.1.2 | Cámara CMOS. | 41 |
| 5.1.3 | Transductor Piezo Eléctrico (PTZ)..... | 41 |
| 5.1.4 | Lampara LED..... | 42 |
| 5.1.5 | Filtro pasa banda..... | 42 |
| 5.2 | CONTROL DE DISPOSITIVO Y SOFTWARE..... | 43 |
| 5.3 | CALIBRACIÓN | 46 |
| 5.3.1 | Calibración del espacio visual | 46 |
| 5.3.2 | Determinación de la longitud de onda experimental del patrón de interferencia para luz cuasi-monocromática: | 47 |
| <i>Capítulo 6</i> | | |
| | RESULTADOS | 50 |
| 6.1 | RECONSTRUCCIONES Y COMPARACIONES | 50 |
| 6.1.1 | Microscopio perfilométrico por interferometría de luz blanca. | 50 |
| 6.1.2 | Microscopio perfilométrico por interferometría de luz cuasi-monocromática. . | 58 |
| 6.1.3 | Comparación Interferometría de luz policromática vs interferometría de luz cuasi-monocromática. | 59 |
| 6.2 | ANÁLISIS DEL ERROR..... | 61 |
| 6.2.1 | Microscopio perfilométrico por interferometría de luz policromática. | 61 |
| 6.2.2 | Microscopio perfilométrico por interferometría de luz cuasi-monocromática. . | 61 |
| 6.3 | OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES | 62 |
| <i>Capítulo 7</i> | | |
| | CONCLUSIONES | 63 |
| | Referencias Bibliograficas..... | 66 |
| Apéndice A: | PRODUCTOS | 69 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 2-1: Experimento de Young..... | 11 |
| Figura 2-2: Interferómetro por división de amplitud de Michelson..... | 12 |
| Figura 2-3: Interferencia Constructiva (a) e Interferencia Destructiva (b). (Sathiamoorthy, 2011)..... | 13 |
| Figura 2-4: Como la longitud de coherencia afecta la interferencia con diferentes cambios de fase, las áreas que interferirán de manera confiable se resaltan en azul: (a) ambos trenes de onda están alineados e interferirán completamente; (b) se ha introducido un desplazamiento menor que la longitud de coherencia, solo una parte de los trenes de ondas interferirá consistentemente; (c) se ha introducido un desplazamiento más largo que la longitud de coherencia, solo se producirá una interferencia aleatoria. (Klempner, 2007). | 15 |
| Figura 2-5: Medida de La coherencia del campo de onda producido por una fuente de luz de tamaño finito..... | 17 |
| Figura 2-6: Calculo de la coherencia de los campos de ondas en dos puntos iluminados por na fuente de luz de tamaño finito. (Hariharan, 2003) | 19 |
| Figura 3-1: Esquema del sistema interferométrico..... | 22 |
| Figura 3-2: (a) Interferograma. (b) Localización de los picos de coherencia de los interferogramas y determinación de las medidas de alturas para tres pixeles arbitrarios..... | 24 |
| Figura 3-3. Descripción del procedimiento. | 29 |
| Figura 4-1: Intensidades Capturadas para el método PSI a cuatro imágenes..... | 34 |
| Figura 4-2: a) Fase envuelta y b) fase desenvuelta de una nanoestructura en forma de escalón por el método PSI a cuatro imágenes. | 34 |
| Figura 4-3: Intensidades correspondientes al método PSI a cinco imágenes..... | 36 |
| Figura 4-4: a) Fase envuelta y b) fase desenvuelta por el método PSI a cinco imágenes..... | 36 |
| Figura 4-5: (a) Función característica de fase envuelta; (b) Función de fase continúa obtenida por el unwrapping de los datos de (a)..... | 37 |
| Figura 4-6: Efecto de ruido aditivo en los datos de fase envuelta: (a) ruido añadido con una amplitud máxima de -2π , la discontinuidad de fase se encuentra correctamente (b) datos sin envolver; (c) ruido de alta amplitud añadido a los mismos datos (d) detección falsa de un salto de fase de 2π . (e) los datos resultantes sin envolver (f) conserva un salto de fase 2π erróneo. (Gåsvik, 2003) | 38 |
| Figura 4-7: (a) Fase Calculada "WRAPPING, para una nanoestructura en forma de escalón, b) Fase desenvuelta "UNWRAPPING" con errores de propagación (Óvalos azules). | 38 |
| Figura 5-1: Montaje elaborado para la construcción del microscopio interferómetro. a) foto real del microscopio perfilométrico. b) esquema del microscopio perfilométrico..... | 39 |
| Figura 5-2: Registro del interferograma (valor de nivel de Gris) en dos puntos del objeto a diferentes caminos ópticos, mientras el piezo realiza un barrido, la localización del pico de coherencia permite establecer la diferencia de altura Δz de los puntos seleccionados. | 40 |
| Figura 5-3: Objetivo interferométrico tipo Mirau. | 41 |
| Figura 5-4: Cámara CMOS. | 41 |
| Figura 5-5: Transductor Piezo Eléctrico (PTZ)..... | 42 |
| Figura 5-6: a) Lámpara LED b) Espectro de la lámpara. | 42 |
| Figura 5-7: Filtro pasa banda..... | 43 |
| Figura 5-8: Rendimiento del Filtro de interferencia de pasa banda 647nm. | 43 |

| | |
|---|----|
| Figura 5-9: Interfaz gráfica para controlar el microscopio perfilométrico por interferometría de luz policromática. | 44 |
| Figura 5-10: Interfaz gráfica para controlar el microscopio perfilométrico por interferometría de luz cuasi-monocromática. | 45 |
| Figura 5-11: Regleta de Calibración. | 46 |
| Figura 5-12: Regleta de calibración observada por la cámara del microscopio perfilométrico. | 47 |
| Figura 5-13: Calibración para determinar la longitud de onda promedio de la luz cuasi coherente luego de interferir. | 48 |
| Figura 5-14: Calibración para determinar a longitud de coherencia experimental de la luz policromática. | 48 |
| Figura 6-1: Vistas superiores de cierta región de una esfera metalizadas por los métodos de a) Detección de mínimos, b) Máximo de la Envolvente y c) Localización por valores de fase. . | 51 |
| Figura 6-2: Vistas superiores de una nanoestructura en forma de escalón por los métodos de a) Detección de mínimos, b) Máximo de la Envolvente y c) Localización por valores de fase. . | 52 |
| Figura 6-3: Vistas superiores de cierta región de una micro lente de Fresnel por los métodos de a) Detección de mínimos, b) Máximo de la Envolvente y c) Localización por valores de fase. | 53 |
| Figura 6-4: Vistas 3D de cierta región de una esfera metalizada por los métodos de a) Detección de mínimos, b) Máximo de la Envolvente y c) Localización por valores de fase..... | 54 |
| Figura 6-5: Comparación de los tres métodos con luz policromática para la esfera..... | 55 |
| Figura 6-6: Vistas 3D de una nanoestructura en forma de escalón por los métodos de a) Detección de máximos, b) Máximo de la Envolvente y c) Localización por valores de fase.. | 55 |
| Figura 6-7: Comparación de los métodos para la nanoestructura en forma de escalón. | 56 |
| Figura 6-8: Vistas 3D de cierta zona de una micro lente de Fresnel por los métodos de a) Detección de máximos, b) Máximo de la Envolvente y c) Localización por valores de fase.. | 57 |
| Figura 6-9: Comparación de los métodos para la micro lente de Fresnel. | 57 |
| Figura 6-10: Reconstrucción de la nanoestructura en forma de escalón para los métodos de interferometría de luz | 58 |
| Figura 6-11: Reconstrucción de cierta región de una esfera metalizada para los métodos de interferometría de luz | 59 |
| Figura 6-12: Comparación entre los métodos de interferometría de luz policromática y de luz cuasi monocromática..... | 60 |
| Figura 6-13: Comparación de los perfiles reconstruidos para la nano estructura en forma de escalón por los diferentes métodos aplicados..... | 60 |
| Figura 6-14: Análisis del error para los métodos de luz policromática..... | 61 |
| Figura 6-15: Análisis del error para los métodos de Luz cuasi-monocromática..... | 62 |
| Figura 0-1: Certificado de ponencia XII CONGRESO INTERNACIONAL EN ELECTRONICA Y TECNOLOGIAS AVANZADAS. | 69 |
| Figura 0-2: Certificado de ponencia XIII CONGRESO INTERNACIONAL EN ELECTRONICA Y TECNOLOGIAS AVANZADAS. | 70 |

INTRODUCCIÓN

La microscopia interferométrica es una técnica ampliamente utilizada para medir la topografía de micro superficies. Los sistemas que usan estas técnicas pueden medir áreas en el rango del campo de visión del instrumento a implementar. Los interferómetros perfilométricos son ampliamente utilizados para estudiar la topografía de la superficie debido a la alta precisión de medición, adquisición y análisis de datos sin contacto. Sin embargo, el costo de un microscopio de estas características es alto. Adicional a esto las empresas ofrecen estos productos compactos y cerrados, impidiendo esto realizar modificaciones que permitan la inclusión de otras metodologías de microtopografía o de microscopía. En este proyecto se presenta la construcción e implementación de un microscopio perfilométrico basado en la interferometría de luz policromática, y con la adaptación de un filtro pasa banda, es posible implementar técnicas de luz cuasi-monocromática.

En el Capítulo 2, se realiza una descripción teórica de los principios de interferometría óptica, superposición de ondas y de coherencia, las cuales son conceptos fundamentales en microscopía interferométrica. En el Capítulo 3, se formalizan los conceptos de interferometría con luz policromática, empezando con el estado del arte, siguiendo con la descripción del prototipo construido, luego la metodología tradicional seguida en el análisis de franjas interferométricas de luz policromática, y por último los métodos implementados para este caso. En el Capítulo 4 se describe todo lo relacionado con la interferometría de luz cuasi-monocromática.

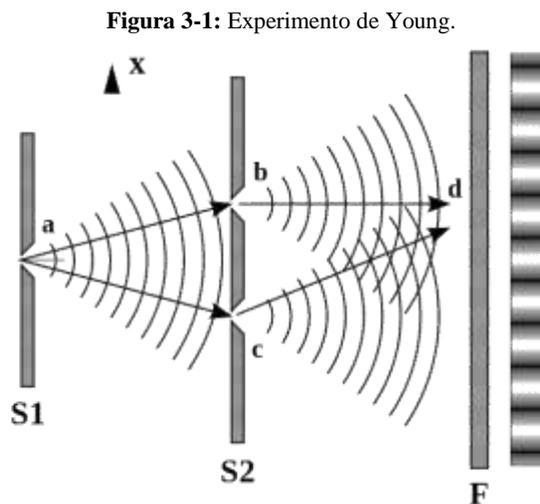
La implementación del microscopio perfilométrico se describe en el Capítulo 5, aquí se describe cada una de las partes del dispositivo interferométrico y su calibración, tanto en la zona de observación como en valores de altura asociada. En el Capítulo 6, se presentan las reconstrucciones perfilométricas de distintas micro superficies, así como una comparación entre los distintos métodos, el análisis del error, observaciones y recomendaciones.

Con los resultados de medición obtenidos por el interferómetro construido, en el Capítulo 7 se discute la resolución, la precisión, ventajas y desventajas de cada uno de los métodos implementados.

PRINCIPIOS DE INTERFEROMETRÍA

La interferometría óptica hace referencia al uso de la interferencia de dos o más ondas. Hay muchas formas de producir interferencia entre dos ondas de luz, pero todas ellas siguen dos reglas básicas: las ondas de luz solo interferirán si provienen de la misma fuente, y en el punto de interferencia, deben ser coherentes; la coherencia es una medida de la capacidad de las ondas para interferir. Hay dos formas fundamentales de interferencia: por división de frente de onda y división de la amplitud.

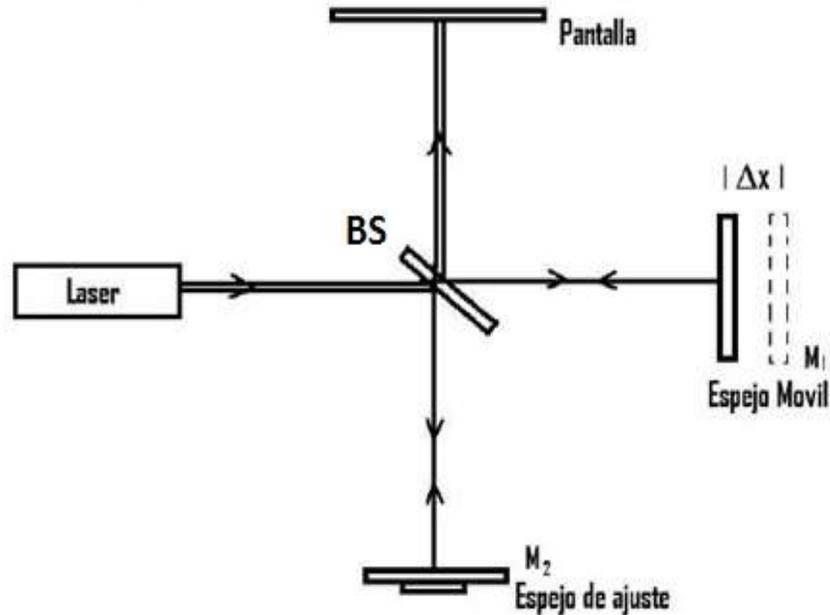
El experimento de Young creado a principios de 1800 es la demostración más antigua de interferencia por división de frente de onda. Se conoce comúnmente como "Experimento de doble rendija de Young". En esta configuración, la luz pasa a través de agujeros separados y se divide en dos frentes de onda similares que luego se expanden e interfieren. Como se muestra en la Figura 2-1, la interferencia da como resultado un patrón de franjas en la pantalla de observación.



Fuente: <https://es.kisspng.com/png-light-double-slit-experiment-young-s-interference-2701990/>

Los interferómetros por división de amplitud, como el interferómetro de Michelson, son los que comúnmente se usan para medición interferométrica. Básicamente, un frente de onda monocromático colimado se dirige a un divisor de haz (BS) que permite que pase cierto porcentaje de la luz, y el restante de la luz se refleja. Los haces se reflejan en los espejos **M1** y **M2** (Figura 2-2) y se recombinan en el BS. La clave para distinguir entre esta configuración y la de división del frente de onda, es que en este caso no interfieren dos partes separadas de un frente de onda, sino que la interferencia ocurre entre dos ondas parciales originadas en la misma onda particular.

Figura 3-2: Interferómetro por división de amplitud de Michelson.



Fuente: <http://fisicaparatodos.freehostia.com/interlab6.jpg>

3.1 SUPERPOSICIÓN DE ONDAS

Una consideración general de la interferencia entre dos ondas se muestra en Gåsvik (2003). La interferencia puede ocurrir cuando dos o más ondas se superponen en el espacio. Asumiendo que las ondas u_1 y u_2 están descritas por,

$$u_1 = U_1 e^{i\phi_1} \quad (2.1.1)$$

y

$$u_2 = U_2 e^{i\phi_2} \quad (2.1.2)$$

respectivamente. Donde El campo resultante es simplemente la suma, es decir.

$$u = u_1 + u_2 \quad (2.1.3)$$

Donde u_1 y u_2 son las amplitudes complejas de las dos ondas que van a interferir. La cantidad apreciable es la intensidad, la cual está dada por,

$$\begin{aligned} I &= |u|^2 = |u_1 + u_2|^2 = U_1^2 + U_2^2 + 2U_1U_2 \cos(\phi_1 - \phi_2) \\ &= I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1I_2} \cos(\Delta\phi) \end{aligned} \quad (2.1.4)$$

donde:

$$\Delta\phi = \phi_1 - \phi_2 \quad (2.1.5)$$

Como se puede observar, la intensidad resultante no depende únicamente de la suma de $I_1 + I_2$, al término $2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\Delta\phi)$ se le llama término de interferencia. Se tiene que, cuando

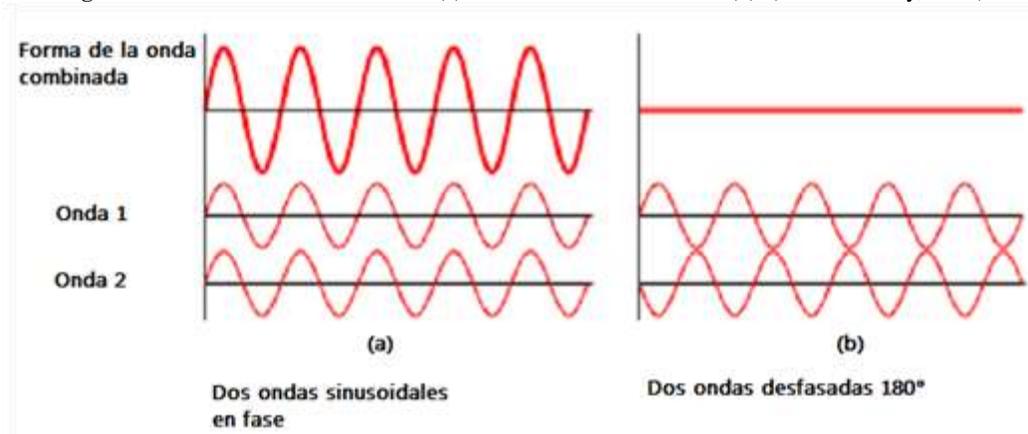
$$\Delta\phi = (2n+1)\pi, \quad \text{para } n = 0, 1, 2, \dots \quad (2.1.6)$$

$\cos(\Delta\phi) = -1$, I es mínima, las dos ondas están desfasadas lo que significa que hay interferencia destructiva, es decir, la intensidad en dicho punto es menor que un cualquier punto donde no exista interferencia. Cuando

$$\Delta\phi = 2n\pi, \quad \text{para } n = 0, 1, 2, \dots \quad (2.1.7)$$

la intensidad alcanza un valor máximo. En este caso las dos ondas están en fase, por lo tanto, se dice que hay interferencia constructiva (Figura 2-3).

Figura 3-3: Interferencia Constructiva (a) e Interferencia Destructiva (b). (Sathiamoorthy, 2011)



Para dos ondas con intensidades iguales $I_1 = I_2 = I_0$ La ecuación (2.1.4) queda

$$I = 2I_0[1 + \cos(\Delta\phi)] = 4I_0 \cos^2\left(\frac{\Delta\phi}{2}\right) \quad (2.1.8)$$

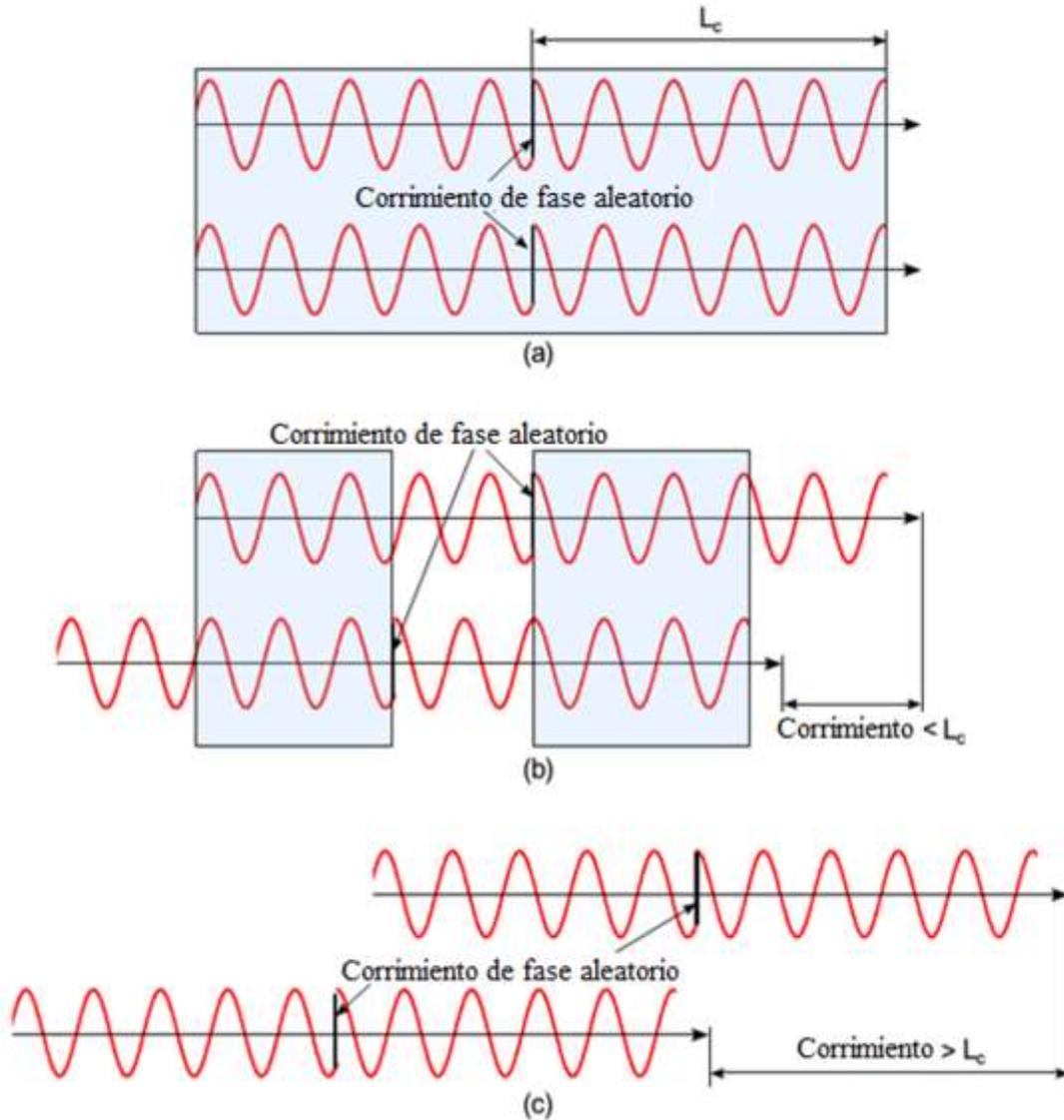
donde la intensidad varía entre 0 y $4I_0$.

3.2 COHERENCIA

La coherencia es la capacidad de las ondas de luz para interferir. Hay dos tipos de coherencia: espacial y temporal. Considerando la Figura 2-2 y 2-3, se podría decir que se produce interferencia, sin embargo, no siempre es el caso. En la Figura 2-3 se supone que las dos ondas que interfieren son de longitud infinita y de una frecuencia constante. Esto, sin embargo, es una idealización ya que ninguna fuente de luz es así de perfecta. Incluso los láseres de modo único que se describen como "monocromáticos" tienen un ancho de banda espectral finito.

Siguiendo el orden de ideas de Gåsvik (2003), la detección de luz (es decir, la medición de intensidad) es un proceso promedio en el espacio y el tiempo. En la Ecuación (2.1.4) se asume que u_1 y u_2 tienen la misma frecuencia. Idealmente, una onda de luz con una sola frecuencia debe tener una longitud infinita, es decir; nunca varía su periodo. Matemáticamente, incluso una onda sinusoidal pura de longitud infinita tendrá una distribución de frecuencia de acuerdo con el teorema de Fourier. Por lo tanto, las fuentes que emiten luz de una sola frecuencia no existen. Una forma de ilustrar la luz emitida por fuentes reales es imaginarla como trenes de ondas sinusoidales de longitud finita con diferencias de fase distribuidas aleatoriamente entre los trenes individuales. La Figura 2-4 muestra dos trenes de ondas sucesivos de las ondas parciales, como los reflejados por los dos espejos en el interferómetro de Michelson, antes de recombinarse en el BS. Los dos trenes de ondas tienen la misma amplitud y longitud L_c , la longitud de cada tren de ondas es la longitud de coherencia de la fuente de luz. La Figura 2-4 (a) solo muestra dos trenes de onda para cada brazo del interferómetro, el detector registra la información de intensidad a velocidades de video, de manera que, debe promediar un gran número de trenes de onda (ya que viajan a la velocidad de la luz). La Figura 2-4 (a) muestra la situación cuando las dos ondas parciales han viajado en longitudes de trayectoria iguales. Se debe tener en cuenta, que entre los trenes de ondas hay un cambio de fase aleatorio o una discontinuidad que simula una fuente de luz "real". En el caso de la Figura 2-4 (a), el interferómetro se alinea perfectamente: las distancias del BS a cada espejo son idénticas. Los cambios de fase abruptos y aleatorios ocurren en el mismo instante en el tiempo. Se observa que, aunque la fase de la onda original fluctúa aleatoriamente, la diferencia de fase entre las ondas parciales 1 y 2 permanece constante en el tiempo. La caja que rodea a todos los trenes de ondas indica que se producirán interferencias con la mayor visibilidad. Debido a la alineación perfecta, la intensidad observada por el detector sigue siendo el caso ideal, dado por la Ecuación (2.1.4). La Figura 2-4 (c) muestra la situación cuando la onda parcial 2 ha recorrido una longitud de trayectoria L_c más larga que la onda parcial 1. La cabeza de la onda entra en la onda parcial 2 y luego coincide con la cola de los trenes de ondas correspondientes en la onda parcial 1. En este caso, solo se producirá interferencia aleatoria. La Ecuación (2.1.4) sigue dando la intensidad instantánea resultante, pero ahora la diferencia de fase fluctúa aleatoriamente a medida que pasan sucesivamente los trenes de onda.

Figura 3-4: Como la longitud de coherencia afecta la interferencia con diferentes cambios de fase, las áreas que interferirán de manera confiable se resaltan en azul: (a) ambos trenes de onda están alineados e interferirán completamente; (b) se ha introducido un desplazamiento menor que la longitud de coherencia, solo una parte de los trenes de ondas interferirá consistentemente; (c) se ha introducido un desplazamiento más largo que la longitud de coherencia, solo se producirá una interferencia aleatoria. (Klempner, 2007).



La Figura 2-4 (b) representa el caso en el que el interferómetro está parcialmente desalineado al tener diferentes caminos ópticos. En este caso, sin embargo, la diferencia de longitud de camino es menor que la longitud de coherencia de la fuente de luz. Esto permite que ocurra alguna interferencia. Las regiones resaltadas son las únicas áreas donde los trenes de la primera onda se alinean y los trenes de la segunda onda se alinean. Estas son las únicas áreas donde la interferencia será constante a través del tiempo. Fuera de estas áreas todavía habrá interferencia entre los trenes de ondas, pero como el cambio de fase entre los trenes de ondas es aleatorio, la interferencia será aleatoria a lo largo del tiempo. Tener esta interferencia aleatoria reduce el contraste del patrón de franjas. Para el caso ideal donde $I_1 = I_2$, la Ecuación (2.1.4) se convierte en:

$$I = I_1 + I_2 + 2\nu\sqrt{I_1I_2} \cos(\Delta\phi) \quad (2.2.1)$$

Donde ν es un valor entre 0 y 1 y se conoce como la visibilidad de las franjas.

$$\nu = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (2.2.2)$$

Donde I_{\max} e I_{\min} son las intensidades máxima y mínima registradas en el patrón de franjas. La Figura 2-4 (c) es un caso donde la diferencia de camino óptico en los dos brazos del interferómetro es mayor que la longitud de coherencia de la fuente de luz. Cuando esto ocurre, no se generan franjas. Como ninguna parte de los trenes de ondas se alinea, se está produciendo una interferencia completamente aleatoria. El término $\Delta\phi$ varía aleatoriamente de 0 a 2π y cuando se promedia a lo largo del tiempo, el coseno de este término tiende a cero, en este caso la Ecuación (2.2.1) queda:

$$I = I_1 + I_2 \quad (2.2.3)$$

Es decir, en donde no hay interferencia la intensidad es la suma sencilla de las intensidades. A menudo se desea saber cuál es la longitud de coherencia de una fuente de luz cuando se configura un interferómetro. Para este propósito, se puede decir que la coherencia temporal, τ_c , es el tiempo en que la diferencia de longitud de camino lleva la visibilidad de franjas a cero;

$$\tau_c = \frac{L_c}{c} = \frac{1}{\Delta\nu} \quad (2.2.4)$$

Donde L_c es la longitud de coherencia, C es la velocidad de la luz en el vacío y $\Delta\nu$ es el ancho de banda de la fuente de luz. La longitud de coherencia L_c también se puede considerar como la distancia que recorre la onda en el tiempo τ_c . Cualquier valor por debajo de esta longitud de coherencia o tiempo producirá interferencia.

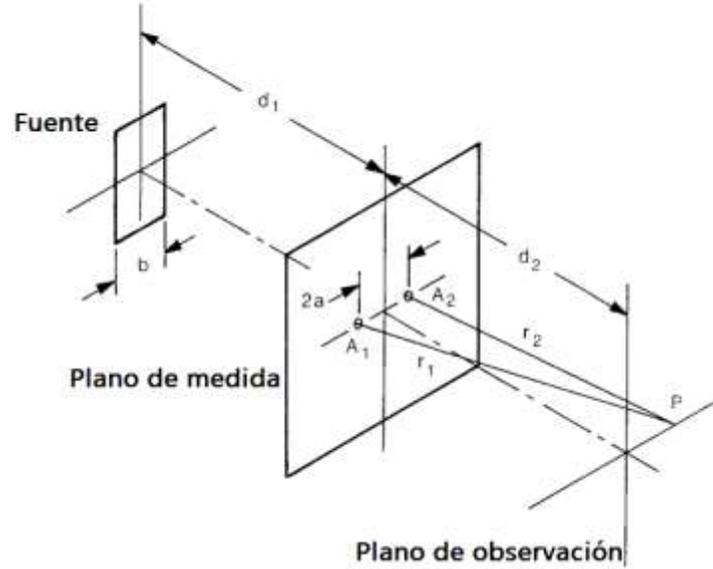
3.2.1 Función de Coherencia Mutua ([Hariharan, 2003](#)).

Se puede evaluar el grado de correlación entre los campos de onda de dos puntos cualquiera, iluminados por una fuente puntual cuasi monocromática. Como se muestra en la Figura 2-5, una fuente S cuasi-monocromática ilumina una pantalla que contiene dos agujeros A_1 y A_2 , y la luz que sale de estos agujeros produce un patrón de interferencia en el plano de observación. Los campos de onda producidos por la fuente S en A_1 y A_2 están representados por las señales analíticas $V_1(t)$ y $V_2(t)$, respectivamente. A_1 y A_2 actúan como dos fuentes secundarias, de modo que el campo de onda en un punto P es el patrón de interferencia producido por ellos y puede ser escrito como:

$$V_p(t) = K_1V_1(t-t_1) + K_2V_2(t-t_2) \quad (2.2.5)$$

Donde $t_1 = r_1/c$ y $t_2 = r_2/c$ son los tiempos necesarios para que las ondas viajen desde A_1 y A_2 hasta P, y K_1 y K_2 son constantes determinadas por la geometría del sistema.

Figura 3-5: Medida de La coherencia del campo de onda producido por una fuente de luz de tamaño finito. (Hariharan, 2003).



Dado que el campo es estacionario (independiente de del tiempo inicial seleccionado), La Ecuación 2.2.5 puede ser reescrita como,

$$V_p(t) = K_1 V_1(t + \tau) + K_2 V_2(t) \quad (2.2.6)$$

Donde $\tau = t_1 - t_2$. La Intensidad en el punto P es, entonces:

$$\begin{aligned} I_p &= \langle V_p(t) V_p^* \rangle \\ &= |K_1|^2 \langle V_1(t + \tau) V_1^*(t + \tau) \rangle + |K_2|^2 \langle V_2(t + \tau) V_2^*(t + \tau) \rangle \\ &\quad + K_1 K_2^* \langle V_1(t + \tau) V_2^*(t) \rangle + K_1^* K_2 \langle V_1^*(t + \tau) V_2(t) \rangle \\ &= |K_1|^2 I_1 + |K_2|^2 I_2 + 2 |K_1 K_2| \text{Re} \{ \Gamma_{12}(\tau) \}, \end{aligned} \quad (2.2.7)$$

Donde I_1 y I_2 son las intensidades en A_1 y A_2 respectivamente, y

$$\Gamma_{12}(\tau) = \langle V_1(t + \tau) V_2^*(t) \rangle \quad (2.2.8)$$

Se conoce como la función de coherencia mutua del campo de ondas en A_1 y A_2 .

3.2.2 Grado complejo de Coherencia

La Ecuación 2.2.7 Se puede reescribir como

$$I_p = I_{p1} + I_{p1} + 2\sqrt{I_{p1}I_{p2}} \operatorname{Re}\{\gamma_{12}(\tau)\}, \quad (2.2.9)$$

Donde $I_{p1} = |K_1|^2 I_1$ y $I_{p2} = |K_2|^2 I_2$ son las intensidades debido a los dos huecos diminutos actuando separadamente, y

$$\gamma_{12}(\tau) = \Gamma_{12}(\tau) / \sqrt{I_1 I_2} \quad (2.2.10)$$

$\gamma_{12}(\tau)$ es llamado el grado complejo de coherencia del campo de ondas en A_1 y A_2 .

Las variaciones espaciales en la intensidad observada a medida que P se mueve a través del plano de observación (las franjas de interferencia) se deben a los cambios en el valor del último término en el lado derecho de la Ecuación 2.2.9. Cuando los dos haces tienen la misma intensidad, la visibilidad de las franjas de interferencia también puede ser reescrita como,

$$v = \operatorname{Re}\{\gamma_{12}(\tau)\} \quad (2.2.11)$$

El grado complejo de coherencia es la medida de la capacidad que tienen dos campos de ondas para interferir. De la discusión previa se tiene que:

$$v = \operatorname{Re}\{\gamma_{12}(0)\} = 1 \quad (2.2.12a)$$

$$v = \operatorname{Re}\{\gamma_{12}(\tau_c)\} = 0 \quad (2.2.12b)$$

$$0 \leq \operatorname{Re}\{\gamma_{12}(\tau)\} \leq 1 \quad (2.2.12c)$$

donde las Ecuaciones 2.2.12a y 2.2.12b representan los dos casos limitantes de coherencia completa e incoherencia respectivamente, mientras que la desigualdad 2.2.12.c representa coherencia parcial.

3.2.3 Coherencia Espacial ([Hariharan, 2003](#)):

Cuando la diferencia en las trayectorias ópticas es pequeña, la visibilidad de las franjas de interferencia depende solo de la coherencia espacial de los campos. Para evaluar el grado de coherencia entre los campos en dos puntos P1 y P2 iluminados por una fuente extendida S (ver Figura I.2), Se procede de la siguiente manera:

- Primero se obtiene una expresión para la coherencia mutua de los campos en estos dos puntos debido a un elemento muy pequeño en la fuente.
- Luego se integra esta expresión en toda el área de la fuente.

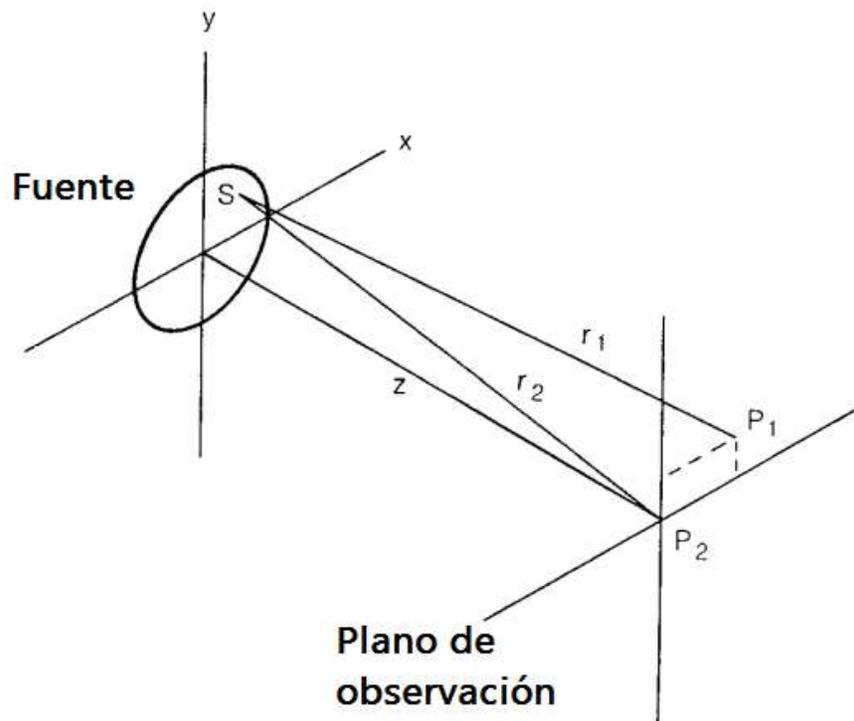
La expresión resultante es similar a la integral de difracción de Fresnel-Kirchhoff y conduce al teorema de van Cittert-Zernike, que se puede afirmar de la siguiente manera:

- Imagine que la fuente es reemplazada por una abertura con una transmisión de amplitud en cualquier punto proporcional a la intensidad en este punto de la fuente.
- Imagine que esta abertura está iluminada por una onda esférica que converge a un punto fijo en el plano de observación (por ejemplo, P_2), y vemos el patrón de difracción formado por esta onda en el plano de observación.

El grado complejo de coherencia entre los campos de onda en P_2 y algún otro punto P_1 en el plano de observación es proporcional a la amplitud compleja en P_1 en el patrón de difracción.

Un caso especial es cuando las dimensiones de la fuente y la distancia de P_1 a P_2 son muy pequeñas en comparación con las distancias de P_1 y P_2 de la fuente. El grado complejo de coherencia de los campos viene dado por la transformada de Fourier bidimensional normalizada de la distribución de intensidad sobre la fuente. La coherencia espacial describe qué tan bien los interferómetros de división del frente de onda formarán patrones de franjas. Más precisamente, la coherencia espacial describe la capacidad de dos puntos distintos de una onda en el espacio para interferir cuando se promedia a lo largo del tiempo.

Figura 3-6: Cálculo de la coherencia de los campos de ondas en dos puntos iluminados por una fuente de luz de tamaño finito. (Hariharan, 2003)



3.2.4 Coherencia Temporal ([Hariharan, 2003](#)):

La coherencia temporal es una descripción de cómo una onda puede correlacionarse consigo misma en un instante de tiempo diferente. Este tipo de coherencia es una indicación de qué tan bien un interferómetro que divide la amplitud producirá patrones de franjas. Para una fuente puntual que irradia en un rango de longitudes de onda, el grado complejo de coherencia entre los campos en P y P2 depende solo de τ , la diferencia en los tiempos de tránsito de la fuente a P1 y P2. La función de coherencia mutua (Ecuación 2.2.8) se reduce entonces a la función de autocorrelación.

$$\Gamma_{11}(\tau) = \langle V(t+\tau)V^*(t) \rangle, \quad (2.2.13)$$

y el grado de coherencia temporal de los campos es,

$$\gamma_{12}(\tau) = \langle V(t+\tau)V^*(t) \rangle / \langle V(t)V^*(t) \rangle \quad (2.2.10)$$

INTERFEROMETRÍA CON LUZ POLICROMÁTICA

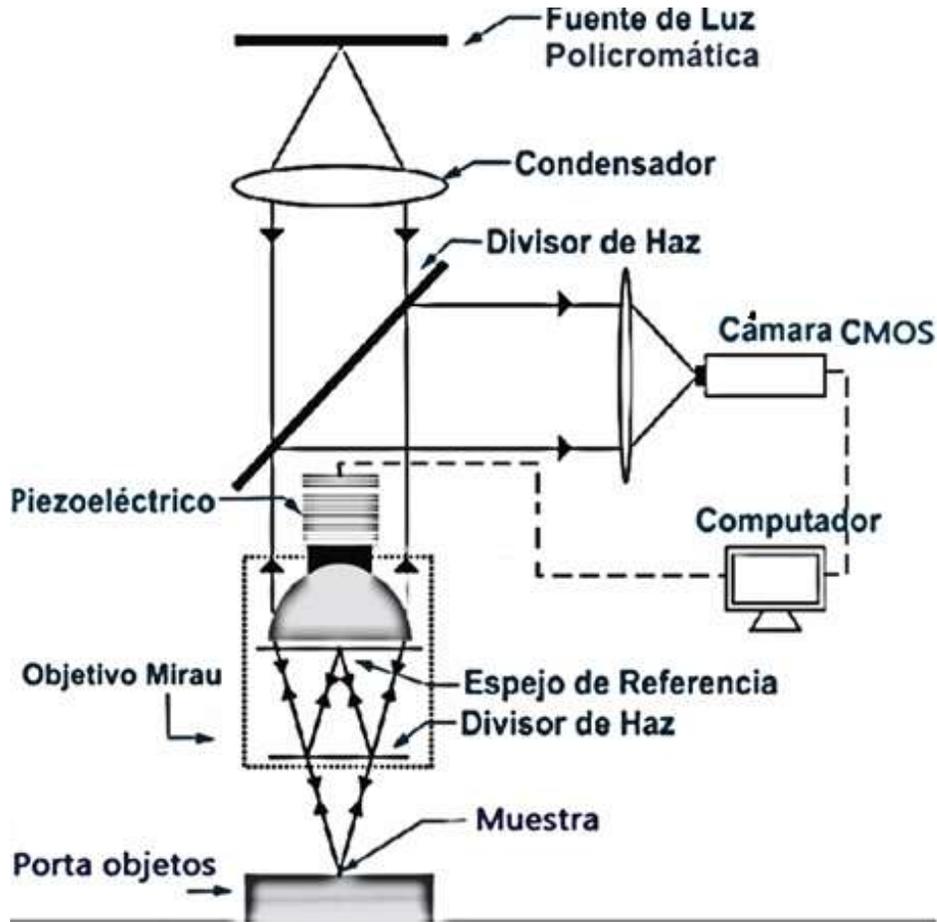
La interferometría con luz policromática de barrido axial se ha utilizado ampliamente para la perfilometría de superficie evitando el problema de ambigüedad de fase que suele presentarse en métodos de luz cuasi-monocromática ([Crane, 1969](#); [Larkin, 1996](#); [Lee & Strand, 1990](#)). Desde que Hooke observó en 1665 que los colores en el patrón de interferencia de luz blanca son sensibles a los espesores entre las superficies reflectantes se le ha dado uso a la luz blanca como instrumento de sensado de superficies. Aunque los principios básicos de la interferometría de luz policromática son conceptos fundamentales de la óptica y se han estudiado durante mucho tiempo, la medición 3-D utilizando interferometría de luz policromática de barrido axial es relativamente reciente ([de Groot & Deck, 1995](#); [Heikkilä & Silven, 1997](#)). Balasubramanian (1982), fue uno de los primeros en proponer un sistema práctico de interferometría de luz policromática para la topografía de perfil de superficies 3D automatizada. En el sistema, la altura relativa de cada punto en una superficie se obtuvo mediante una posición de escaneo en un interferograma donde el contraste alcanzaba un máximo. Davidson (1987) utilizó la técnica de interferometría de luz policromática para medir el perfil de microcomponentes en los circuitos integrados, demostraron que la resolución lateral podría mejorarse con interferometría de luz policromática o luz blanca en comparación con la del microscopio convencional, lo que amplía la aplicación de interferometría de luz blanca. Caber (1993) desarrolló un perfilador interferométrico para superficies rugosas. Deck y Groot (1994) propusieron un perfilador de alta velocidad basado en la exploración vertical de la interferometría de luz blanca. Sandoz en 1997 propuso la transformada de wavelet como herramienta de procesamiento en la interferometría de luz policromática. R. Windecher y H. J. Tiziani (1999) midieron la rugosidad óptica de superficies mediante el uso de interferometría de luz blanca extendida. Olszak (2000) propuso una técnica alternativa para ampliar el campo de visión de objetos grandes. En esta técnica, la muestra se escaneó lateralmente con un plano de coherencia inclinado, de modo que la exploración vertical y lateral se sincronizó. En este caso, el escaneo vertical ubica puntos en una superficie, y el escaneo lateral extiende el campo de visión del interferómetro. En los últimos años se han publicado muchas más aplicaciones de la interferometría de luz policromática o luz blanca ([Arlante & Gómez, 2010](#); [P Sandoz, Zeggari, Froehly, Pretet, & Mougín, 2007](#)).

4.1 MICROSCOPIO PERFILOMÉTRICO POR INTERFEROMETRÍA DE LUZ POLICROMÁTICA

El funcionamiento básico de un interferómetro de luz policromática, consiste en dividir un haz de luz de la misma fuente en dos haces separados. En la Figura 3-1 La fuente de luz policromática incide en el Divisor de Haz, haciendo que cierto porcentaje de la luz pase se dirija hacia el objetivo interferométrico. El Divisor de haz permite que la cámara pueda registrar los patrones de interferencia. Dentro del objetivo interferométrico tipo Mirau, el haz incide sobre el divisor de haz y se dirige hacia el objeto que se va a medir, se refleja desde el mismo, mientras

que el otro haz (de referencia) sigue una trayectoria óptica conocida y constante. Ambos haces se superponen permitiendo que haya interferencia si existen las condiciones adecuadas. El principio básico se muestra en la Figura 3-1 que explica la configuración usada en este trabajo.

Figura 4-1: Esquema del sistema interferométrico.



4.2 ANÁLISIS DE FRANJAS DE INTERFERENCIA DE LUZ POLICROMÁTICA

Al usar un interferómetro que se describe en la sección anterior, cuya fuente de luz es policromática, las reflexiones sobre la muestra ubicada en el portaobjeto, se combinan con las reflexiones provenientes del espejo de referencia (Török & Kao, 2007), localizado en el objetivo interferométrico. El campo eléctrico $E(t)$ que llega al detector es la superposición de la luz que proviene de la muestra y el espejo de referencia:

$$E(t) = E_s(t) + E_r(t + \tau), \quad (3.1.1)$$

donde E_s y E_r son respectivamente las amplitudes ópticas del haz señal o de la muestra y del haz de referencia. Mientras que τ , es el tiempo de retraso debido a la diferencia de longitud

en los caminos ópticos de los dos haces. La intensidad registrada por el detector está dada por (ver Ecuación 2.2.9),

$$I_d = \left\langle |E(t)|^2 \right\rangle = I_s + I_r + 2\sqrt{I_s I_r} \mathbb{R}e\{\gamma(\tau)\}, \quad (3.1.2)$$

donde $\gamma(\tau)$ es la forma normalizada del *grado complejo de coherencia mutua*, que se expresa como,

$$g(t) = \frac{\left\langle E_s^*(t) E_r(t+t) \right\rangle}{\sqrt{I_s + I_r}}. \quad (3.1.3)$$

En general, el grado complejo de coherencia mutua incluye los efectos de coherencia espacial y temporal. Para un interferómetro de amplitud como el interferómetro Mirau, la coherencia espacial se puede despreciar considerando un punto sobre la fuente incoherente espacialmente, así la coherencia mutua se reduce a la *auto-coherencia o coherencia temporal*, en este caso:

$$I_d(\tau) = \left\langle |E(\tau)|^2 \right\rangle = I_s + I_r + 2\sqrt{I_s I_r} \mathbb{R}e\{\gamma_{tc}(\tau)\}, \quad (3.1.4)$$

donde, $\mathbb{R}e\{\gamma_{tc}(\tau)\}$ es la parte real del grado complejo de coherencia temporal de la fuente de luz, la cual es la *forma normalizada de la función de auto-coherencia* $\gamma_{11}(\tau)$,

$$g_{11}(t) = \frac{G_{11}(t)}{G_{11}(0)}, \quad (3.1.5)$$

donde $G_{11} = \left\langle E(t+\tau) E^*(\tau) \right\rangle$ y el subíndice 11, corresponde a un único punto de la fuente incoherente. El grado complejo de coherencia normalizado de la fuente de luz es dado por la transformada de Fourier de la densidad espectral de energía de la fuente de luz. Si esta fuente de luz es policromática y tiene una densidad espectral de energía gaussiana $G(f)$ con ancho espectral Δf y frecuencia media \bar{f} , el grado complejo de coherencia temporal γ_{11} estará dado por,

$$g_{11}(t) = G_0 \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left[-\left(\frac{f - \bar{f}}{\Delta f}\right)^2\right] \exp(-i2\pi f t) df, \quad (3.1.6)$$

donde G_0 es una constante. Teniendo en cuenta que $\gamma_{11}(0) = 1$, se tiene que:

$$\gamma_{1c}(\tau) = \exp\left[-(\pi\tau\Delta f)^2\right] \exp(-i2\pi\bar{f}\tau), \quad (3.1.7)$$

así la Ecuación (3.1.4), se puede escribir como:

$$I_d(\tau) = I_s + I_r + 2\sqrt{I_s I_r} \exp\left[-(\pi\tau\Delta f)^2\right] \cos(2\pi\bar{f}\tau) \quad (3.1.8)$$

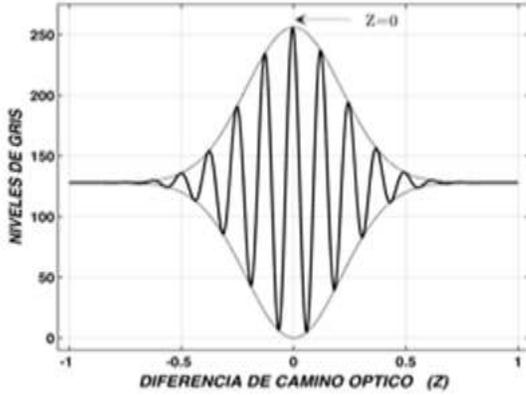
o

$$I_d = I_0 \left[1 + V(\tau) \cos(2\pi\bar{f}\tau)\right], \quad (3.1.9)$$

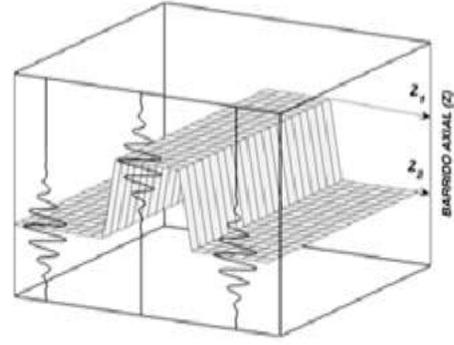
donde I_0 es la intensidad de fondo ($I_s + I_r$), V es la función de contraste de las franjas, visibilidad o envolvente del patrón de franjas observado. Esta función V está dada por:

$$V(\tau) = \left(\frac{2\sqrt{I_s I_r}}{I_s + I_r}\right) \exp\left[-(\pi\tau\Delta f)^2\right]. \quad (3.1.10)$$

Figura 4-2: (a) Interferograma. (b) Localización de los picos de coherencia de los interferogramas y determinación de las medidas de alturas para tres píxeles arbitrarios.



(a)



(b)

Si en el sistema de la Figura 3-2 (a) y (b) el origen de coordenadas es tomado sobre un punto z en particular en la dirección axial, donde los dos caminos ópticos son iguales (contacto óptico) y la superficie de prueba se mueve a lo largo del eje z en una serie de pasos de tamaño Δz , entonces la intensidad sobre un punto (x, y) en el plano de la imagen que corresponde a un punto del objeto de altura h , se puede escribir como:

$$I_d(\tau) = I_s + I_r + 2\sqrt{I_s I_r} \gamma \left(\frac{p}{c} \right) \cos \left[\left(\frac{2\pi}{\lambda} \right) p + \phi_0 \right]. \quad (3.1.11)$$

donde I_s e I_r son las intensidades de los dos haces que actúan independientemente, $\gamma \left(\frac{p}{c} \right)$ es el grado complejo de coherencia, la cual corresponde a la visibilidad de la envolvente de la franjas de interferencia, y $\cos \left[\left(\frac{2\pi}{\lambda} \right) p + \phi_0 \right]$ es la modulación cosenoidal donde λ corresponde a la longitud de onda media de la fuente, $p = 2(z - h)$ es la diferencia de las longitudes de los caminos ópticos atravesados por los haces y ϕ_0 es la diferencia del corrimiento de fase debido a las reflexiones sobre el divisor de haz, los espejos y posiblemente el material de prueba. La Figura 3-2(b), muestra las variaciones de intensidad sobre el punto de una imagen cuando el objeto se barre axialmente.

4.2.1 Ventajas de usar una fuente de luz policromática

Generalmente los láseres se usan como fuente de luz para los interferómetros porque es más fácil obtener franjas de interferencia debido a su longitud de coherencia, independientemente de la diferencia de trayectoria entre los dos haces interferentes. Sin embargo, hay ciertas ventajas de utilizar la luz policromática (Sathiamoorthy & Ahmed, 2011). La primera ventaja es que se evita el ruido debido a las franjas de interferencia falsas o el speckle, debido a que la longitud de coherencia de la luz policromática es muy pequeña y solo se puede obtener interferencia cuando la longitud de la trayectoria es de unas cuantas micras. Por lo tanto, aunque todavía existen reflejos indeseados en el interferómetro de luz blanca, estos no producen franjas

que puedan aumentar el ruido. Para un dispositivo óptico cuyo propósito es encontrar la topografía de la muestra, es muy importante que la muestra esté enfocada por la cámara de registro, o de lo contrario, las mediciones serán incorrectas.

Es muy difícil determinar el enfoque en una superficie lisa debido a la ausencia de estructuras. Una ventaja al usar luz blanca es la presencia de franjas de interferencia que define con precisión el enfoque, es decir; las franjas de contraste máximo se obtienen solo cuando las longitudes de recorrido coinciden exactamente. Por lo tanto, moviéndose a través de la muestra buscando franjas de contraste máximo, se puede obtener el enfoque correcto.

4.3 MÉTODOS DE RECONSTRUCCIÓN IMPLEMENTADOS

En la Sección 3.1 se describe la configuración del microscopio implementado para este trabajo. En esta sección se describe los métodos de reconstrucción implementados usando interferometría de luz policromática. El transductor piezoeléctrico (PZT), varía la distancia óptica del brazo muestra del interferómetro y las variaciones de altura a través de la muestra pueden ser determinadas buscando la posición que tiene el PZT cuando se obtiene el máximo contraste de franjas. Este modo de operación es conocido como modo de sensado del pico de coherencia por barrido vertical ([Arias-Hernández, Molina-Prado, & Meneses-Fonseca, 2015](#)). En este trabajo se implementan tres métodos para ubicar el pico de coherencia: Detección de máximos o mínimos, Máximo de la envolvente y Localización por valores de fase.

4.3.1 Detección de Máximos o Mínimos.

La detección del máximo o mínimo es una técnica que aprovecha el hecho de que la interferencia con luz policromática solo puede registrar un valor máximo o mínimo de intensidad en todo el rango donde se produce interferencia. Según la Ecuación (3.1.9), las franjas se encuentran moduladas por una envolvente $V(\tau)$ presentando un máximo o mínimo de intensidad en puntos donde la diferencia de camino óptico es cero. Determinar la forma del objeto consiste en localizar la posición del máximo o mínimo del interferograma para cada punto del objeto, desplazando uno de los brazos del interferómetro Mirau, de tal manera, que cada punto pasará por el plano de contacto óptico en un valor de desplazamiento del PTZ, dependiendo de la diferencia de altura que tenga los diferentes puntos del objeto. La cámara CMOS registrará los valores de la intensidad del interferograma de tal forma, que permite almacenar el desplazamiento del PTZ asociado al valor de intensidad máximo o mínimo. Así se construye una matriz con las posiciones de desplazamiento del PTZ que brinda información de altura del objeto discretizada en un número de niveles de gris propio de la cámara utilizada. El criterio para escoger si es el máximo o el mínimo del interferograma con el que se trabajara, dependerá si las franjas de interferencia presenten un desfase con respecto al máximo de la envolvente. Se procura escoger aquella cuya franja coincida o esté más cercana al máximo o mínimo de la envolvente. En este trabajo, debido a los materiales utilizados se escogió el valor mínimo del interferograma $\min\{I_m(i,j)\}$.

4.3.2 Máximo de la Envolvente.

El método para detectar el pico de coherencia usando la envolvente del interferograma utiliza la Transformada de Fourier ([Gåsvik, 2003](#)). El método de la transformada de Fourier fue concebido por Takeda ([Takeda, Ina, & Kobayashi, 1982](#)), quien empleó el método de la transformada rápida de Fourier (FFT) para el análisis de franjas. Al interferograma registrado para un pixel $g(z)$ se le aplica la Transformada de Fourier obteniendo su espectro.

$$G(f_z) = \mathfrak{F}\{g(z)\} = \int_{-\infty}^{\infty} g(z)e^{-2\pi if_z z} dz \quad (3.4.1)$$

En el espacio de frecuencias se ubica el primer armónico que contiene la información de frecuencias presente en el interferograma y se filtra con una ventana tipo hanning de la forma:

$$Hann(f_z) = \frac{1}{8} \left[1 - \cos \left(2\pi \left(\frac{f_z - f_0}{b_f} \right) \right) \right] \quad (3.4.2)$$

De manera que,

$$G'_f(f_z) = G(f_z) \bullet Hann(f_z) \quad (3.4.3)$$

Donde f_0 es la frecuencia portadora. Posteriormente se aplica la transformada inversa,

$$g'_f(z) = \mathfrak{F}^{-1}\{G'_f(f_z)\} = \int_{f_z} G'_f(f_z) e^{2\pi if_z z} df_z \quad (3.4.4)$$

Finalmente se obtiene el módulo o envolvente del interferograma.

$$|g'_f(z)| = \sqrt{(\text{Re}[g'_f(z)])^2 + (\text{Im}[g'_f(z)])^2} \quad (3.4.5)$$

Donde, $\text{Re}[g'_f(z)]$ y $p(z) = \arctan\left(\frac{\text{Im}[g'_f(z)]}{\text{Re}[g'_f(z)]}\right)$ son la parte real e imaginaria de la transformada inversa respectivamente. Finalmente se calcula el máximo de dicha envolvente asociándolo al punto donde la diferencia de camino óptico es cero. Los pasos que describen este procedimiento se pueden ver en la Figura 3-3 en los pasos 1, 2, 3 y 4.

4.3.3 Localización de Valores de Fase.

Este método ([Arias, Meneses, Suárez, & Gharbi, 2009](#); [Gåsvik, 2003](#)) sigue beneficiándose de las propiedades de la Transformada de Fourier, específicamente de la sensibilidad de la fase o también conocida como la propiedad de corrimiento,

$$\mathfrak{I}\{g'_f(z-a)\} = G'_f(f_z)e^{-2\pi i(f_z a)} \quad (3.4.6)$$

Una vez recuperada la transformada de Fourier inversa, se calcula $|g_f(z)|$ y la fase $p(z)$ del interferograma,

$$p(z) = \arctan\left(\frac{\text{Im}[g'_f(z)]}{\text{Re}[g'_f(z)]}\right) \quad (3.4.7)$$

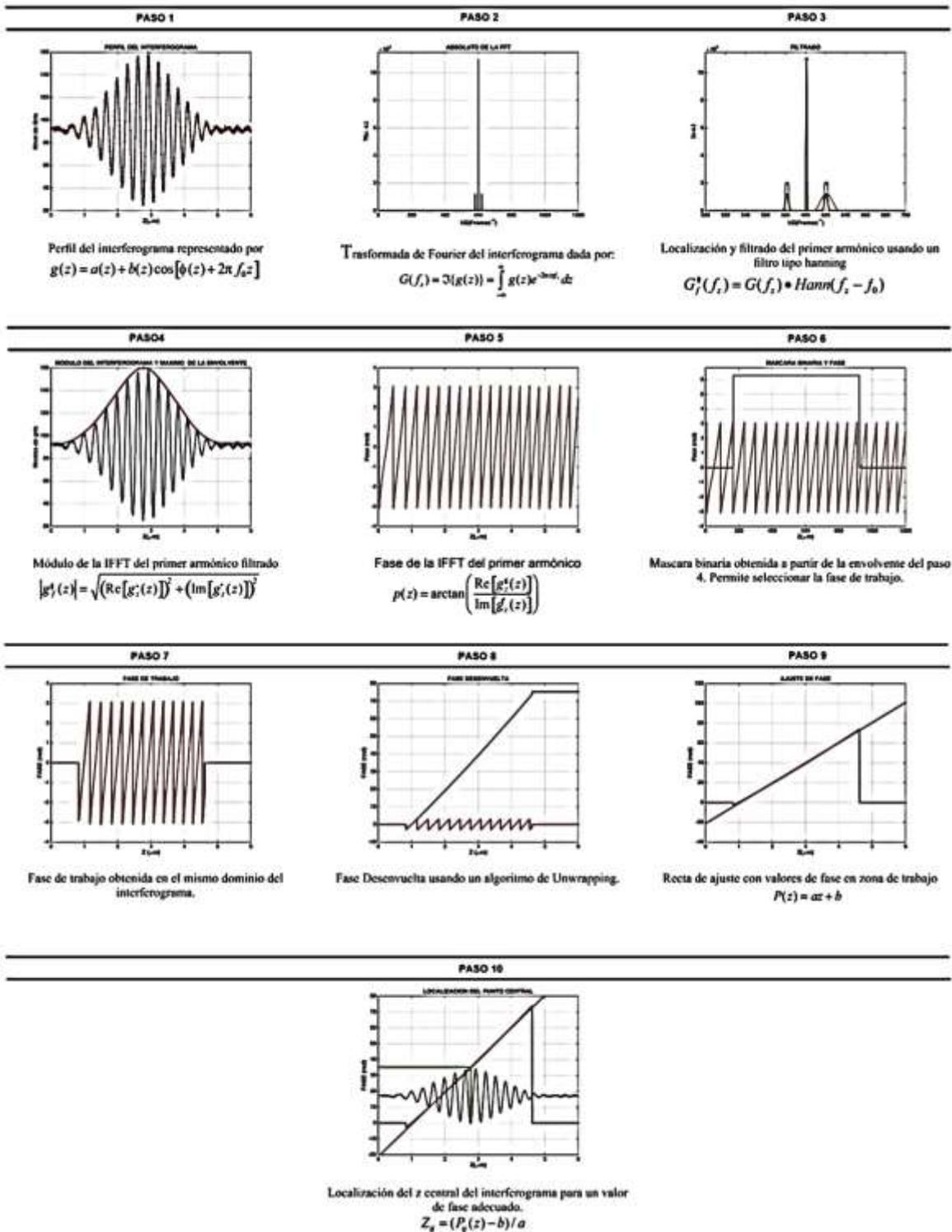
Con la ayuda del módulo de la Ecuación (3.4.5) se crea una máscara binaria para filtrar la zona de la fase asociada al interferograma o fase de trabajo. Para localizar el pico de coherencia se desenvuelve la fase con un algoritmo de *unwrapping* cuyo punto inicial de desenvolvimiento y el máximo de la envolvente coinciden.

Se fija un valor de fase asociado al punto inicial $P(z)$ de desenvolvimiento para busca el valor de z usando una función de ajuste por mínimos cuadrados sobre la fase desenvuelta.

$$P(z) = az + b \quad (3.4.8)$$

Los pasos que describen este procedimiento se pueden ver en la Figura 3-3, En el paso 1, se puede ver claramente el interferograma. Para implementar el método de detección de máximos es suficiente preguntar por el valor máximo o mínimo de intensidad registrado. De los pasos 1 a 4 se describe el proceso del método del máximo de la envolvente, en este caso solo se debe preguntar por el máximo de la envolvente, la cual no siempre coincide con el máximo de intensidad del interferograma. Para implementar el método de Localización de valores de fase se hace necesario tener en cuenta los 10 pasos.

Figura 4-3. Descripción del procedimiento.



INTERFEROMETRÍA CON LUZ CUASI-MONOCROMÁTICA

La superposición de dos o más haces de luz en cualquier punto sobre el espacio puede producir franjas de interferencia. El análisis de estas franjas tienen gran utilidad en metrología óptica y uno de sus principales objetivos es extraer la información de la fase. La interferometría utiliza el principio de superposición de ondas y extrae la información de estas cuando se logran ciertas condiciones de coherencia. Si la luz de una fuente se divide en dos para superponerse nuevamente en cualquier punto del espacio, la intensidad en el área de superposición varía desde máximos (cuando dos crestas de ondas alcanzan el mismo punto simultáneamente) hasta mínimos (cuando un valle y una cresta alcanzan el mismo punto); esto se conoce como un patrón de interferencia. La interferometría de luz cuasi-monocromática utiliza interferómetros cuya fuente de luz es una fuente cuasi-monocromática, estos dispositivos utilizan la interferencia de la luz para realizar mediciones precisas de superficies, espesores, rugosidad de superficie, potencia óptica, homogeneidad del material, distancias y demás, basados en las deformaciones de frente de onda con una alta precisión del orden de una fracción de la longitud de onda. La interferometría de luz cuasi-monocromática también ha sido implementada ampliamente ([Meneses-Fabian & Rivera-Ortega, 2012](#); [Suezou Nakadate & Saito, 1985](#); [S Nakadate, Saito, & Nakajima, 1986](#)). En este trabajo, para el interferómetro de luz cuasi-monocromática, se sigue utilizando la lámpara LED, pero en el trayecto de la luz que va a interferir, se coloca un filtro pasa banda que permite aumentar la longitud de coherencia.

En este capítulo, se describe las características más importantes de la interferometría con luz cuasi-monocromática, así como una de las técnicas más usadas para extraer dicha información de fase. A esta técnica, la cual se basa en un cambio de fase entre los haces de interferencia por un valor conocido, mientras que sus amplitudes se mantienen constantes, se le llama interferometría de corrimiento de fase, interferometría de muestreo de fase, interferometría de paso de fase o *Phase Shifting*, y se abrevia por "PSI" ([Schwider, 1990](#)).

5.1.1 Ventajas de usar luz cuasi-monocromática.

La principal ventaja de usar luz cuasi-monocromática como la de un láser, es la facilidad con la que se consigue interferencia. Esto es gracias a que la longitud de coherencia es mucho mayor a la de la luz policromática o luz blanca. Otra de las ventajas que se evidencian en este trabajo, tiene que ver con el volumen de datos necesarios para realizar las reconstrucciones perfilométricas, la cual es drásticamente reducido. Mientras que para algunas reconstrucciones con luz policromática fueron necesario registrar hasta 2000 fotogramas por muestra, para este caso, dependiendo del método y con una correcta calibración, con 4 o 5 fotogramas son suficientes.

5.1.2 Microscopio perfilométrico por interferometría de luz cuasi-monocromática

El funcionamiento básico de un interferómetro de luz cuasi monocromática, es prácticamente igual al de luz policromática explicado en el Capítulo 3. Un haz de luz de la misma fuente se

divide en dos haces separados: uno de los haces pasa a través del objeto que se va a medir, o se refleja desde el mismo, mientras que el otro haz (de referencia) sigue una trayectoria óptica conocida y constante. A diferencia del interferómetro de luz policromática, la diferencia de camino óptico entre los brazos del interferómetro (brazo de referencia y brazo de la muestra) puede tener mayores distancias ya que la longitud de coherencia es mucha mayor. Para que el microscopio perfilométrico descrito en la Sección 3.1 trabaje por interferometría de luz cuasi-monocromática, es necesaria la adaptación del filtro pasa banda justo antes de producirse la interferencia.

5.2 INTERFEROMETRÍA POR PHASE SHIFTING

Los primeros estudios en las técnicas de corrimiento de fase se pueden encontrar en el trabajo de Carré (1966), que describe un comparador fotoeléctrico de interferencia, pero realmente comenzó con Crane (1969) en su artículo “*Interference Phase Measurement*”. Brunning y compañía en 1974 implementaron un interferómetro digital de medición de frente de onda para pruebas de superficies ópticas y lentes. Estas técnicas también se han aplicado en interferometría de patrón speckle ([Creath, 1985](#); [Suezou Nakadate & Saito, 1985](#); [Robinson & Williams, 1986](#)) y también a la interferometría holográfica. ([S Nakadate et al., 1986](#); [Stetson & Brohinsky, 1988](#))

La interferometría de corrimiento de fase o *Phase Shifting* es una técnica eficiente para analizar los interferogramas y recuperar la información de la fase. Tradicionalmente, los interferogramas se medían ubicando el centro de una franja y luego trazando a lo largo de la franja. La interferometría de desplazamiento de fase evita la necesidad de rastrear la ubicación de las franjas y permite una reconstrucción punto por punto del frente de onda. En la interferometría de desplazamiento de fase, un frente de onda de referencia se mueve a lo largo de su dirección de propagación respecto el frente de onda del haz de referencia cambiando con esto la diferencia de fase entre ellos. Es posible determinar la fase midiendo los cambios de irradiancia correspondientes a cada cambio de fase. En esta técnica, se crean un conjunto de N interferogramas modificados en fase, que están representados por un conjunto de N ecuaciones, donde cada ecuación tiene tres incógnitas llamadas luz de fondo, luz de modulación y la fase del objeto ([Bruning et al., 1974](#)). Estas incógnitas espaciales se consideran constantes durante la aplicación de la técnica PSI ([Creath, 1988](#)). Este enfoque también tiene la ventaja de que es posible una mejor relación señal / ruido a niveles de luz bajos, ya que la señal en cada elemento se integra durante todo el período de medición. Si las amplitudes complejas de los frentes de onda de referencia y de la muestra se escriben como ([Hariharan, 2003](#)):

$$a(x, y) = a_0 e^{-ik\phi}, \quad (4.3.1)$$

y

$$b(x, y) = b_0 e^{-ik\Phi(x,y)}, \quad (4.3.2)$$

donde $\Phi(x, y)$ es el perfil deformado del frente de onda de la muestra, la intensidad del patrón de interferencia es:

$$I(x, y, \varphi) = a_0^2 + b_0^2 + 2a_0b_0 \cos[k(\Phi(x, y) - \varphi)]. \quad (4.3.3)$$

Una representación alternativa de la Ecuación (4.3.3) es:

$$I(x, y, \varphi) = f + g_1 \cos(k\varphi) + h_1 \sin(k\varphi) , \quad (4.3.4)$$

donde los coeficientes f , g_1 y h_1 son funciones de x y y . Esta es una serie de Fourier que consiste únicamente en el término de fondo y los primeros armónicos. En consecuencia, los coeficientes en cualquier punto se pueden encontrar midiendo la intensidad $I(x, y, \varphi)$ para valores de φ dados por:

$$\varphi = \varphi_j = j\lambda / 2m, \quad (4.3.5)$$

donde $j = 1, 2, \dots, mq$ y m y q son enteros, y λ es la longitud de onda promedio de la fuente cuasi coherente, entonces:

$$\begin{aligned} g_1 &= (2/mq) \sum_{j=1}^{mq} I(x, y, \varphi_j) \cos(k\varphi_j) \\ &= 2a_0b_0 \cos[k\Phi(x, y)], \end{aligned} \quad (4.3.6)$$

y

$$\begin{aligned} h_1 &= (2/mq) \sum_{j=1}^{mq} I(x, y, \varphi_j) \sin(\varphi_j) \\ &= 2a_0b_0 \sin[k\Phi(x, y)], \end{aligned} \quad (4.3.7)$$

entonces la fase deformada con la información de la muestra se puede expresar como:

$$\Phi(x, y) = (1/k) \arctan(h_1 / g_1), \quad (4.3.8)$$

o

$$\tan[\Phi(x, y)] = \frac{\sum_1^j I(x, y, \varphi_j) \sin(\varphi_j)}{\sum_1^j I(x, y, \varphi_j) \cos(\varphi_j)}. \quad (4.3.9)$$

5.3 MÉTODOS DE RECONSTRUCCIÓN IMPLEMENTADOS

En la Ecuación (4.3.8) se muestra forma de extraer la información de fase deformada en función de g_1 y h_1 que se adquieren de forma interactiva, por ejemplo, se utilizan hasta 100 lecturas entonces $m = 25$, $q = 4$, Uno de los métodos de corrimiento de fase más simple es el de Carré (1966), este involucra solo cuatro mediciones de la intensidad en un punto que corresponde a tres incrementos iguales de la fase. Entonces es posible calcular la diferencia de fase original entre los haces, así como la magnitud de los cambios de fase ([Cheng & Wyant, 1985](#)). En este trabajo, después de un proceso de calibración previo, en donde se obtiene de manera experimental la distancia equivalente a la longitud de onda del patrón de franjas de interferencia, se implementaron los métodos de *Phased Shiffting* a 4 imágenes y a 5 imágenes las cuales se explican a continuación:

5.3.1 Phased Shiffting a 4 imágenes.

En este caso $m=4$ y $q=1$ ($j=4$), usando la Ecuación (4.3.5) y teniendo en cuenta que λ equivale a 4π en valores de fase (luego de interferir la longitud de onda es la mitad de la longitud de onda promedio de la fuente, entonces

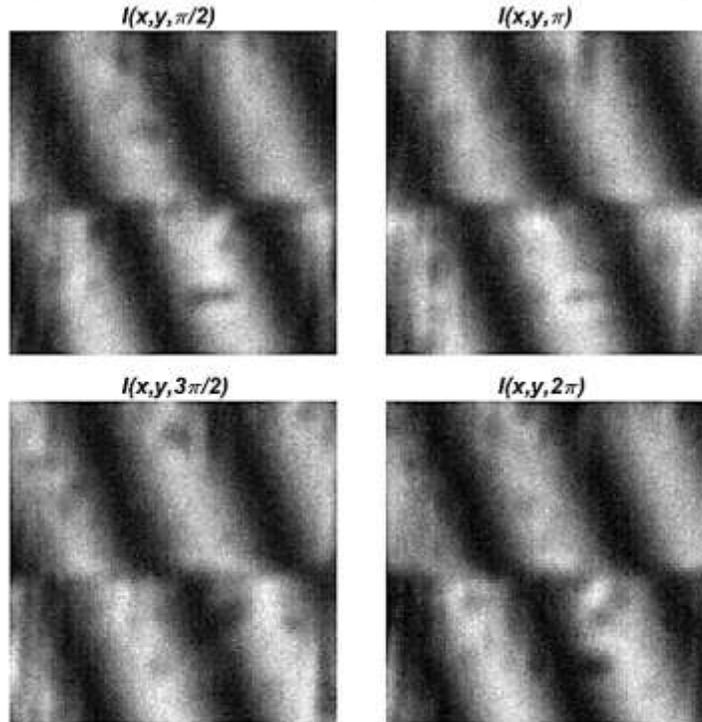
$$\varphi_j = j\lambda / 2m = \pi / 2, \pi, 3\pi / 2, 2\pi, \quad (4.4.1)$$

entonces, la Ecuación (4.3.9) queda:

$$\tan \Phi = \frac{I(\pi / 2) - I(3\pi / 2)}{I(2\pi) - I(\pi)} \quad (4.4.2)$$

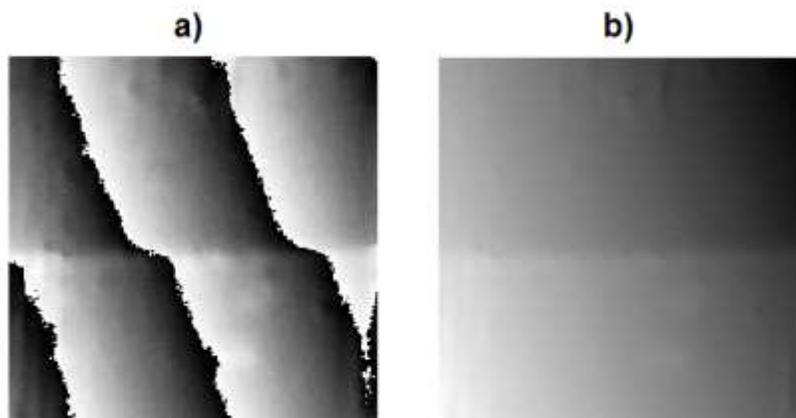
En la Figura 4-1 se muestran las intensidades capturadas por la cámara CMOS para una nanoestructura en forma de escalón en cada uno de los cuatro desfases.

Figura 5-1: Intensidades Capturadas para el método PSI a cuatro imágenes.



Luego de calculada la fase con la Ecuación 4.4.2 debido a que la función tangente está restringida a valores de $-\pi$ y π , se procede a desenvolver la fase con una algoritmo de *Phased Unwrapping* 2D, la Figura 4-2 muestra la fase envuelta (*wrapping*) y la fase desenvuelta (*unwrapping*) correspondientes a la nanoestructura anterior.

Figura 5-2: a) Fase envuelta y b) fase desenvuelta de una nanoestructura en forma de escalón por el método PSI a cuatro imágenes.



En la Figura 4-2 b) la información topográfica de la muestra esta codificada en valores de fase (radianes), además, en el proceso de desenvolvimiento de la fase la información se encuentra de manera ascendente, de manera que se hace necesario reajustar la inclinación, esto se puede lograr con un simple algoritmo de rotación y recolocación. Para obtener los valores de altura

correspondientes a cada pixel, se hace una reconversión de valores de fase a valores de altura z usando la calibración.

5.3.2 Phased Shiffting a 5 imágenes.

Para este caso $m=5$ y $q=1$ ($j=5$), usando la Ecuación (4.3.5) los valores de corrimiento de fase son:

$$\varphi_j = j\lambda / 2m = 2\pi / 5, 4\pi / 5, 6\pi / 5, 8\pi / 5, 2\pi \quad (4.4.3)$$

entonces, la Ecuación (4.3.6) queda:

$$\tan \Phi = \frac{0.95 * I(2\pi/5) + 0.58 * I(4\pi/5) - 0.95 * I(6\pi/5) - 0.58 * I(8\pi/5)}{I(2\pi) + 0.30 * I(2\pi/5) - 0.80 * I(4\pi/5) - 0.80 * I(6\pi/5) + 0.30 * I(8\pi/5)} \quad (4.4.4)$$

En la Figura 4-3 se muestran las intensidades capturadas por la cámara CMOS para la nanoestructura en forma de escalón mostrada anteriormente en cada uno de los cinco desfases.

Con la Ecuación 4.4.4 se calcula la fase y al igual que en el caso anterior se procede a aplicar un algoritmo de desenvolvimiento de fase o *phase unwrapping* para obtener la información de la topografía del objeto. En la Figura 4-4 se muestran la fase envuelta y desenvuelta para este caso.

Figura 5-3: Intensidades correspondientes al método PSI a cinco imágenes.

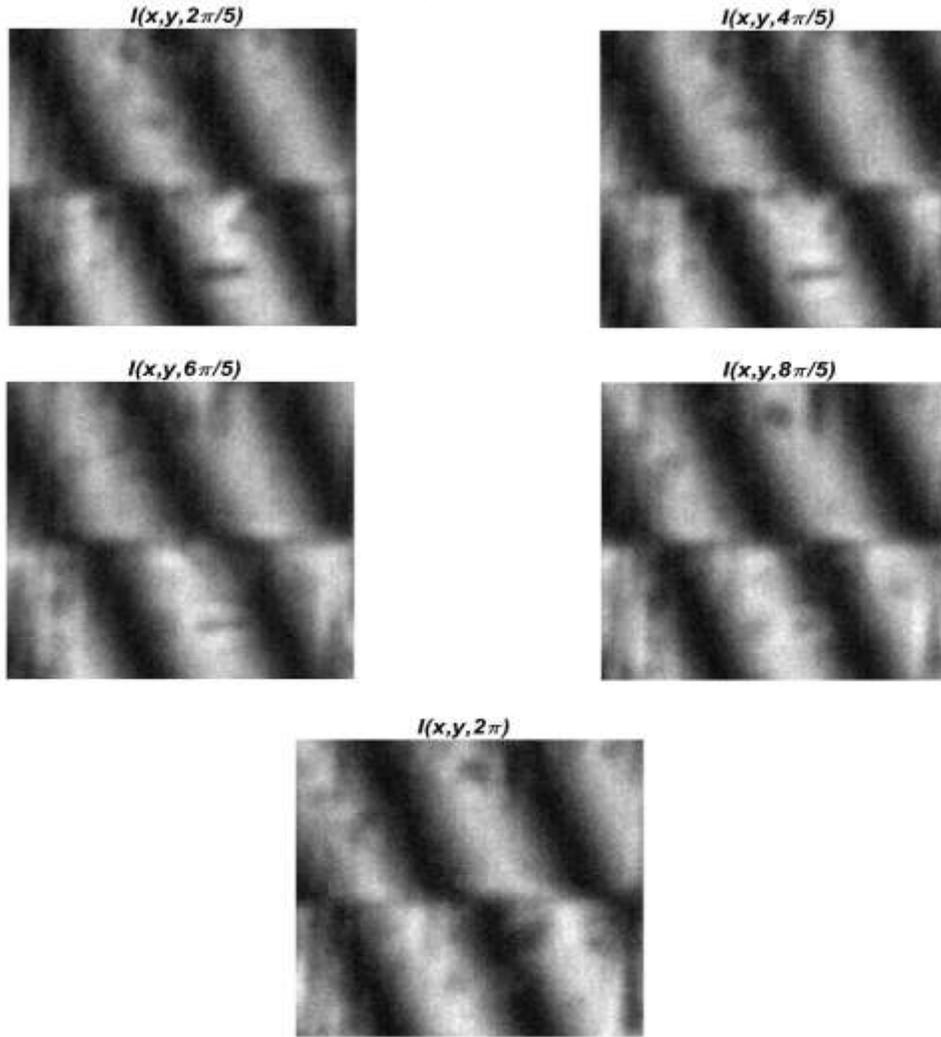
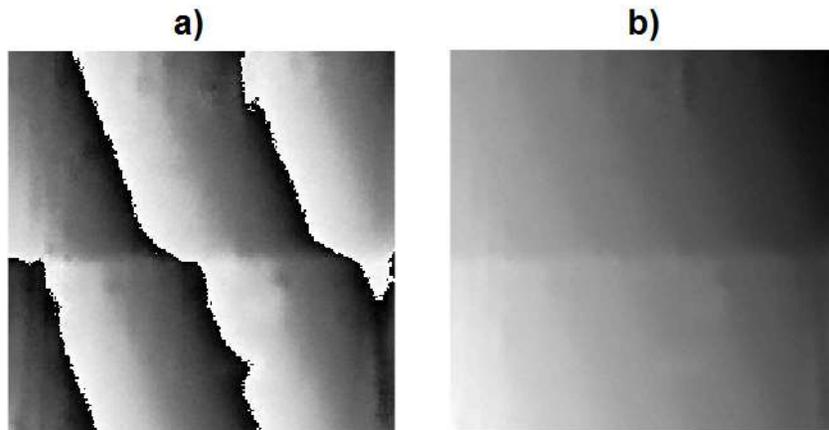


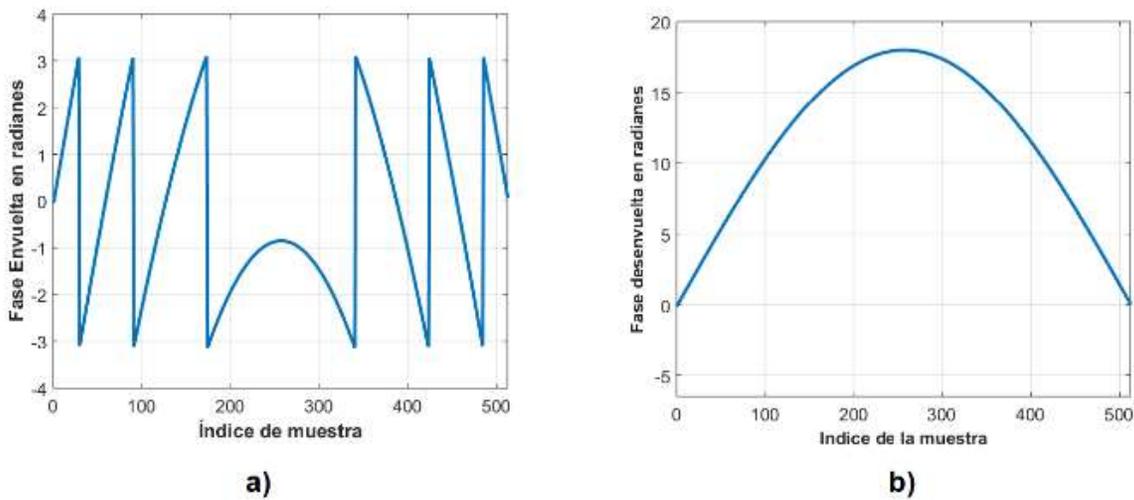
Figura 5-4: a) Fase envuelta y b) fase desenvuelta por el método PSI a cinco imágenes.



5.3.3 Phased Unwrapping

Cada uno de los algoritmos utilizados para recuperar la fase $\Phi(x, y)$ conduce a una expresión que involucra la función arcotangente. La arcotangente tiene una ambigüedad inherente, ya que se pueden agregar múltiplos de 2π a un argumento dado, y el arcotangente devolverá el mismo resultado. La función arcotangente tiene valores principales en el rango de $-\pi$ a π . Si la función de fase excede este rango, los valores de fase se envolverán nuevamente en este rango. Para ilustrar los efectos del envoltamiento de fase es útil el análisis en una sola dimensión. Supongamos que la fase verdadera tiene un perfil de aberración esférica como se muestra en la Figura 4-5.

Figura 5-5: (a) Función característica de fase envuelta; (b) Función de fase continua obtenida por el unwrapping de los datos de (a).

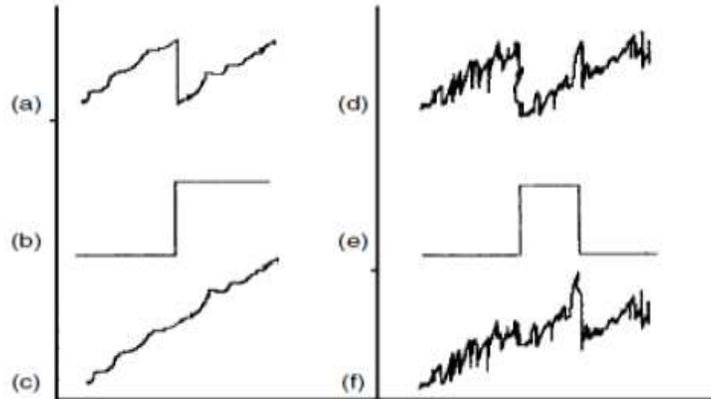


En el centro del patrón de fase, la fase original coincide con la fase envuelta. Sin embargo, una vez que la fase alcanza un valor de π en el límite, la función arcotangente vuelve a colocar estos valores en el rango $-\pi$ a π eliminando múltiplos enteros de 2π del valor real hasta que el valor resultante se encuentre dentro del rango. El *Unwrapping* se hace necesario debido a que el paso final en el proceso de los algoritmos de PSI es desenvolver la fase a lo largo de una de la trayectoria, contando las discontinuidades cada 2π . De manera que se añade 2π si el cambio es de -2π y se resta 2π si el cambio es de 2π (Gåsvik, 2003). Si ϕ aumenta, la pendiente de la función es positiva, y viceversa para la disminución de fase. La clave para desarrollar algoritmos de desenvolvimento de la fase es la capacidad para detectar con precisión los saltos de fase 2π . En el caso de datos de fase envueltos sin ruido y donde estos datos se muestrean adecuadamente (es decir, los gradientes de fase son significativamente menor que 2π), entonces será adecuado un método simple para desenvolverla y todo lo que se requiere es un recorrido secuencial a través de los datos (línea por línea) para integrar la fase añadiendo o restando 2π en los saltos de fase.

En muchos problemas de medición, el ruido en los datos muestreados es un factor importante que contribuye en la falsa identificación de saltos de fase. La Figura 4-6 muestra el efecto de la adición de ruido a los datos desenvueltos. Es evidente que a medida que la amplitud del ruido se aproxima a 2π , los saltos de fase reales queden ocultos. En el caso de datos

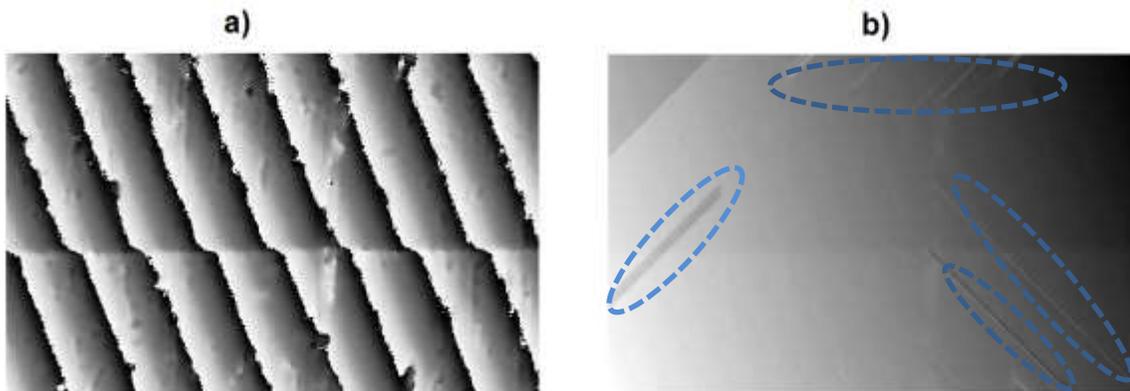
unidimensionales, la única solución a este problema es suavizar los datos de franjas sinusoidales sin procesar, con un filtro pasa bajo. Sin embargo, esto no siempre funciona y en la operación de filtrado se pierde información.

Figura 5-6: Efecto de ruido aditivo en los datos de fase envuelta: (a) ruido añadido con una amplitud máxima de -2π , la discontinuidad de fase se encuentra correctamente (b) datos sin envolver; (c) ruido de alta amplitud añadido a los mismos datos (d) detección falsa de un salto de fase de 2π . (e) los datos resultantes sin envolver (f) conserva un salto de fase 2π erróneo. (Gåsvik, 2003)



Para que los métodos simples de desenvolvimiento funcionen, los datos deben ser continuos en toda la matriz de imagen (sin discontinuidades) y extenderse a los límites de la ventana de muestra. Una discontinuidad de fase podría ser causada por un cambio rápido en el parámetro de medición, como un paso de gran altura en un componente bajo prueba. En estas circunstancias, los errores en el desenvolvimiento de fase se propagan desde el defecto u orificio en los datos a través del resto de la matriz de datos. Esto es particularmente grave si los datos se escanean línea por línea en una dirección. Los problemas presentados por defectos o agujeros en los datos se vuelven aún más complejos cuando la forma del agujero se vuelve complicada. En la Figura 4-7 podremos apreciar errores al momento de utilizar el método de desenvolvimiento de fase.

Figura 5-7: (a) Fase Calculada "WRAPPING", para una nanoestructura en forma de escalón, b) Fase desenvuelta "UNWRAPPING" con errores de propagación (Óvalos azules).

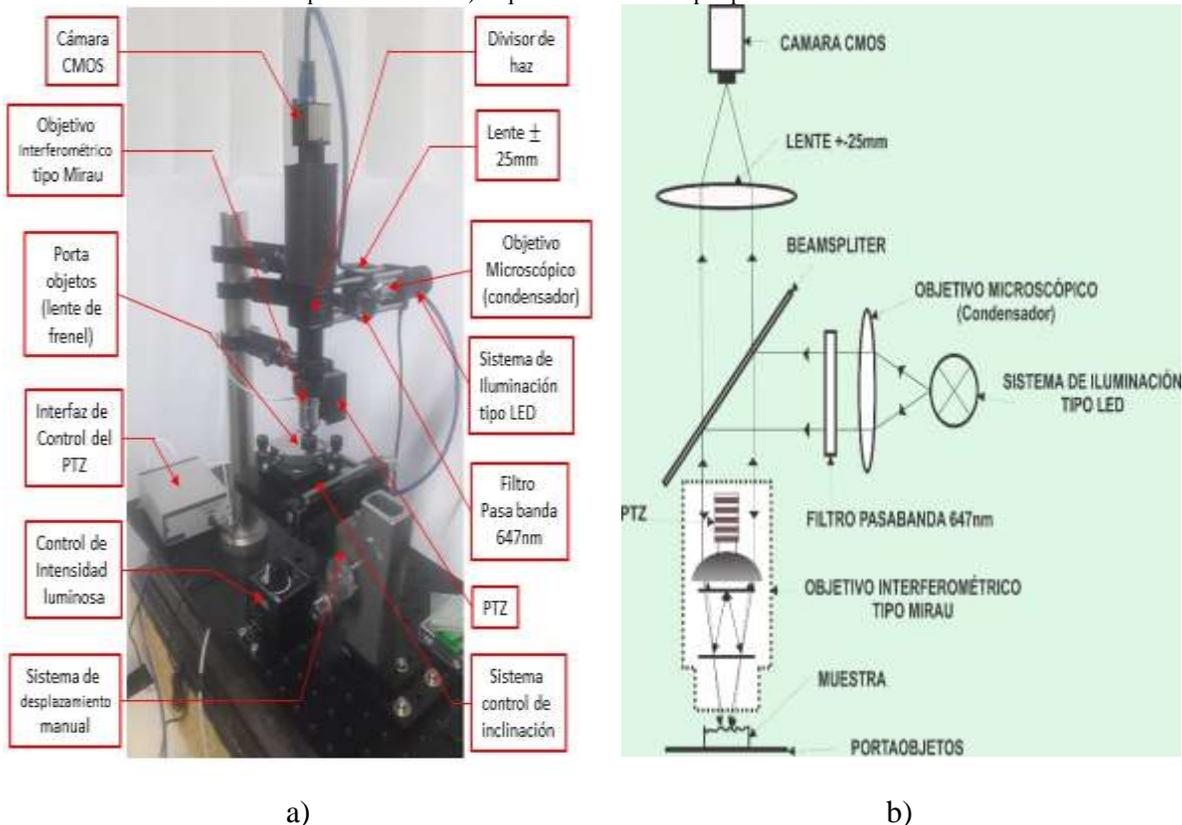


IMPLEMENTACIÓN DEL MICROSCOPIO PERFILOMÉTRICO

6.1 DESCRIPCIÓN DEL MONTAJE

En este trabajo se construye un dispositivo experimental que consta de una cámara digital tipo CMOS de 752x480 píxeles, un objetivo interferométrico tipo Mirau 10x un sistema de traslación piezoeléctrico con resolución de 1 nm y rango de trabajo de 100µm y un sistema de iluminación tipo LED blanca. Un software construido permite controlar el proceso de captura de la cámara, así como la región de interés, sincronizado con el barrido axial del piezoeléctrico. El objetivo es establecer el punto donde se produce la interferencia máxima constructiva (Pico de Coherencia) y relacionarlas con alturas de la muestra. Con este propósito se obtiene un numero de imágenes determinado por el paso del piezoeléctrico y la profundidad del objeto de interés. Esto crea un patrón de interferencia llamado interferograma para cada punto o pixel sobre la imagen (Figura 5-2).

Figura 6-1: Montaje elaborado para la construcción del microscopio interferómetro. a) foto real del microscopio perfilométrico. b) esquema del microscopio perfilométrico.

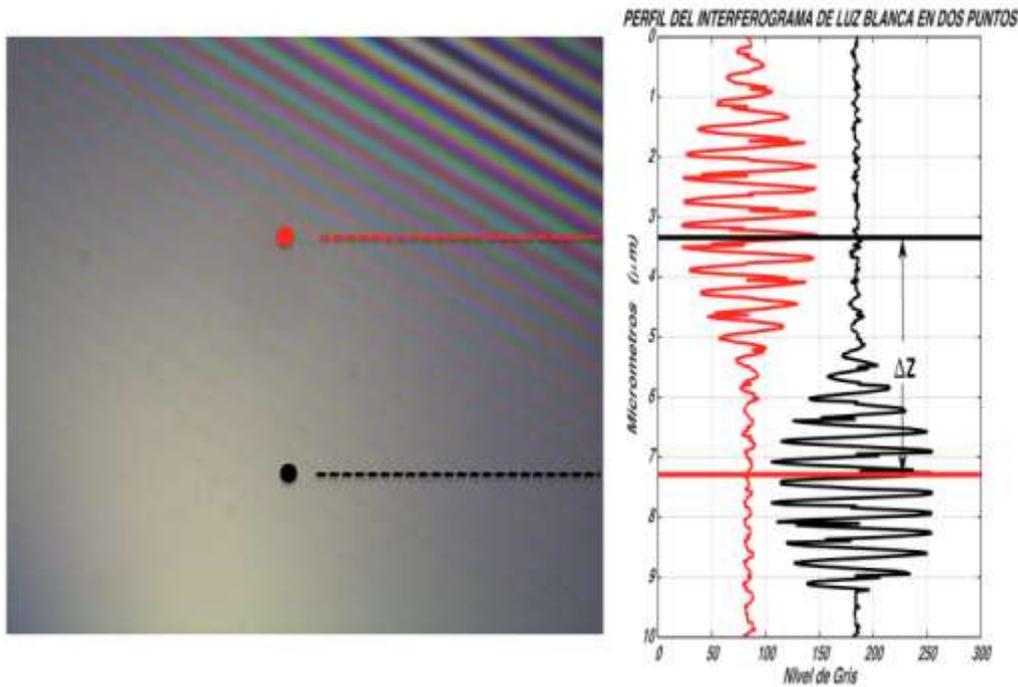


El interferómetro está construido para usar la técnica de interferometría de escaneo de pico de coherencia usando luz policromática, y también, con la adaptación de un filtro de luz monocromática, se puede implementar técnicas para luz cuasi-monocromática. El dispositivo

básicamente consta de un motor piezoeléctrico en la dirección de escaneo (PTZ), una fuente de luz LED, un beamsplitter (BS) o divisor de haz ubicado en el eje óptico y una cámara CMOS 3.0. La Figura 5-1 muestra detalladamente la configuración.

Una vez realizada la configuración descrita en la Figura 5-2, es posible obtener una reconstrucción 3D de la superficie de la muestra relacionando la posición del PTZ requerida para producir el píxel más brillante en cada punto de la imagen. Esto normalmente se realiza con una fuente de luz monocromática; sin embargo, si la muestra contiene diferencias de alturas superiores a la podría haber varias posiciones diferentes en las que se produciría un máximo de intensidad. Al utilizar luz policromática es posible configurar el sistema de modo que solo haya un punto en el que se produzca este máximo. El único límite en la resolución de alturas se establece en función de qué tan bien el algoritmo de medición del pico de coherencia puede encontrar el máximo del brillo (y por lo tanto la posición de la superficie) a medida que el PTZ escanea axialmente. Cada píxel del conjunto de la cámara CMOS actúa efectivamente como un interferómetro individual y, por lo tanto, se crea una reconstrucción de la superficie muy precisa. A continuación, se muestran las especificaciones de algunos de los componentes más importantes del microscopio perfilométrico.

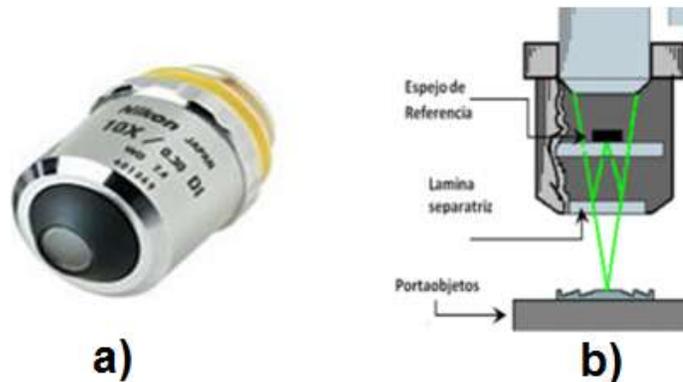
Figura 6-2: Registro del interferograma (valor de nivel de Gris) en dos puntos del objeto a diferentes caminos ópticos, mientras el piezo realiza un barrido, la localización del pico de coherencia permite establecer la diferencia de altura Δz de los puntos seleccionados.



6.1.1 Objetivo Interferométrico.

El objetivo usado tiene en su interior un interferómetro tipo Mirau con un aumento de 10X. Este dispositivo a diferencia del interferómetro tipo Michelson, tiene la ventaja de que la interferencia se produce a lo largo del eje óptico. La desventaja del Mirau es que existe una obstrucción central en el sistema, pero esto no es un problema para aumentos promedios como el de nuestro caso ya que el tamaño de la obstrucción es igual al campo de visión de la muestra. En la Figura 5-3 a) se muestra el objetivo usado para este trabajo y en la Figura 5-3 b) se muestra el esquema de un interferómetro tipo Mirau.

Figura 6-3: Objetivo interferométrico tipo Mirau.



- a) Fuente: <https://www.edmundoptics.com/p/10x-nikon-cf-ic-epi-plan-di-interferometry-objective/16067/>.
 b) Esquema Interferómetro tipo Mirau (Arias-Hernández et al., 2015)

6.1.2 Cámara CMOS.

Para este trabajo se cuenta con una cámara a color con sensor tipo CMOS (Figura 5-4), con una resolución de 752x480 píxeles y salida de video USB 3.0. Con el objetivo de reducir el tamaño de los datos que deben procesarse, se selecciona una región de interés dentro del campo de visión de la cámara y se trabaja en niveles de grises.

Figura 6-4: Cámara CMOS.



Fuente: <https://www.edmundoptics.es/f/EO-USB-3.0-CMOS-Machine-Vision-Cameras/14561/>

6.1.3 Transductor Piezo Eléctrico (PTZ).

Este dispositivo permite realizar el desplazamiento axial del sistema interferométrico. EL PTZ (Figura 5-5) utilizado en este trabajo tiene una resolución axial de 0.1nm y un rango total de

trabajo de $100\ \mu\text{m}$. Para controlar este sistema se utiliza EO-Drive de *Edmund Optics* a la cual se accede desde una interfaz gráfica desarrollada en *Matlab*.

Figura 6-5: Transductor Piezo Eléctrico (PTZ)

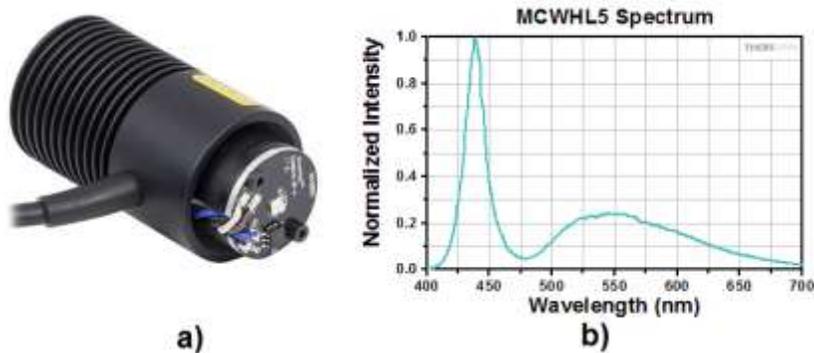


Fuente: <https://www.edmundoptics.com/p/nanopositioning-piezo-actuator/27986/>

6.1.4 Lámpara LED.

Las especificaciones de la lámpara LED usada para este trabajo son de gran importancia porque ofrecen información acerca del tipo de franjas que deben producirse, así la longitud de onda media que se espera de la fuente, etc. Para este interferómetro se usa un lámpara LED MCWHL5 de *Thorlabs* que tiene una temperatura de color correlacionada de 6500 K, emite más de $800\ \text{mW}$ de potencia y está montado en el extremo de un disipador de calor de $30.5\ \text{mm}$ de diámetro. La lámpara y su espectro se muestran en la Figura 5-6.

Figura 6-6: a) Lámpara LED b) Espectro de la lámpara.



Fuente: <https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=MCWHL5>

6.1.5 Filtro pasa banda.

El filtro usado en este trabajo (para luz cuasi monocromática) puede eliminar el ruido de fondo no deseado al tiempo que mejoran la relación señal/ruido en el proceso de obtención de las

imágenes de intensidad. Este dispositivo permite que el microscopio perfilométrico descrito en la Sección 3.1 pueda trabajar con luz cuasi-monocromática.

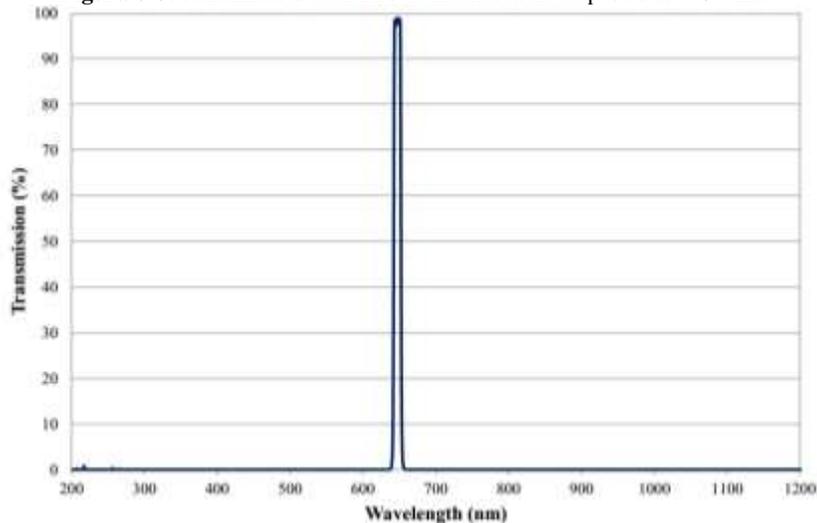
Figura 6-7: Filtro pasa banda.



Fuente: <https://productimages.edmundoptics.com/6856.jpg>

El la Figura 5-7 se muestran varios filtros pasa banda similares al implementado, estos filtros permiten el paso de luz en un ancho de banda muy corto, el de este trabajo tiene una longitud de onda promedio es de 647 nm , en la Figura 5-8 se muestra el rendimiento de dicho filtro, la cual es determinante al momento de obtener las reconstrucciones por los métodos de *Phase Shiftng*, ya que estos parámetros determinan el rango en el que hay que tomar las mediciones para poder extraer la fase con la información de la muestra de una manera correcta.

Figura 6-8: Rendimiento del Filtro de interferencia de pasa banda 647nm .



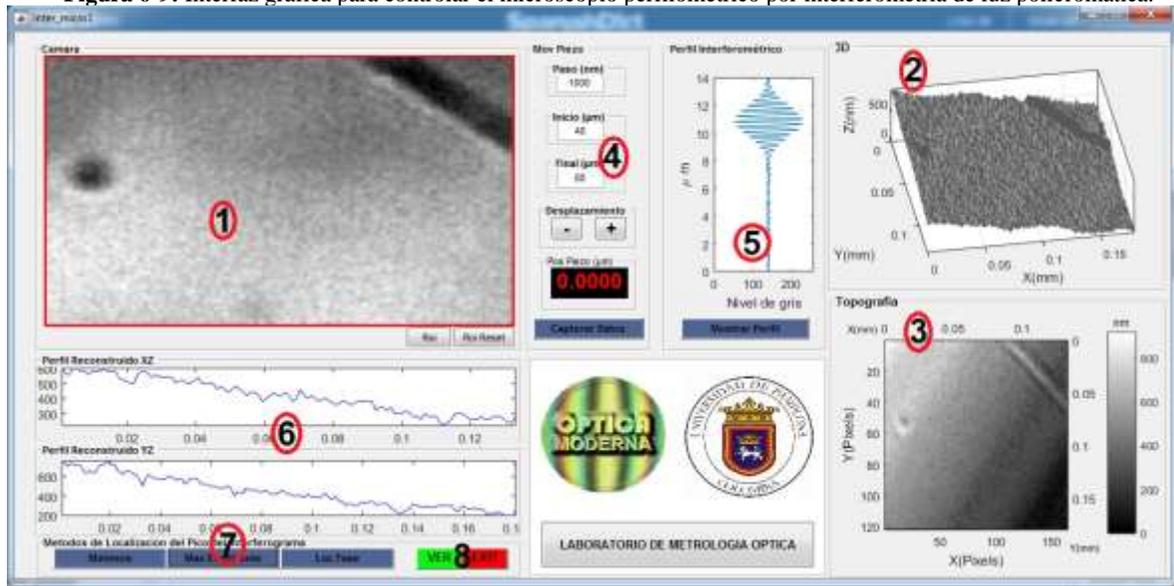
Fuente: <https://www.edmundoptics.com/document/download/352029>

6.2 CONTROL DE DISPOSITIVO Y SOFTWARE

Se diseño una interfaz gráfica para el control de la cámara CMOS y el PTZ y la implementación de los métodos de interferometría de luz policromática, al iniciar la interfaz esta activa la cámara CMOS y coloca el piezo en una posición central con respecto al rango de movimiento. Para el microscopio perfilométrico por interferometría de luz policromática, debido al gran volumen

de información que debe procesarse, es adecuado primero realizar el proceso de captura secuencial de imágenes y guardarlas para luego procesarlas con el método de interés. El software se desarrolla en la plataforma MATLAB, y en particular se hace uso del entorno GUI, que permite un control sencillo de las aplicaciones del software, lo cual elimina la necesidad de aprender un lenguaje y escribir comandos a fin de ejecutar un adecuado uso del microscopio perfilométrico. El software construido permite controlar el proceso de captura de la cámara, así como la región de interés, sincronizado con el barrido axial del piezoeléctrico. Se obtiene un numero de imágenes determinado por el paso del piezoeléctrico y la profundidad del objeto de interés (Figura 5-9).

Figura 6-9: Interfaz gráfica para controlar el microscopio perfilométrico por interferometría de luz policromática.

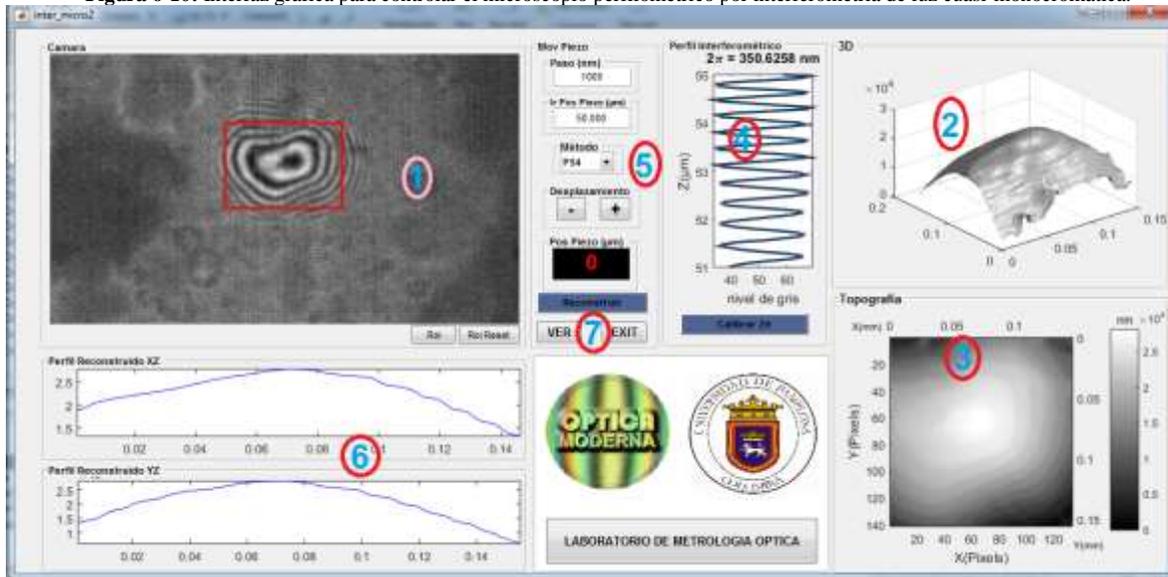


La interfaz cuenta con 3 ventanas principales, donde se muestra la cámara en vivo, la reconstrucción 3D, y la imagen topográfica. A continuación, se describen cada uno de los óvalos rojos señalados en la Figura 5-9.

1. *Cámara:* Esta ventana muestra lo que está captando la cámara en tiempo real, además se usa para mostrar la imagen que veía la cámara al momento de tomar los datos, y con el recuadro rojo señala la zona reconstruida. En la parte inferior derecha se observan dos *push bottom* que permiten elegir la región de interés (*roi*) o reestablecerla (*roi reset*).
2. *3D:* Aquí se muestra la reconstrucción tridimensional del objeto luego de procesado los datos.
3. *Topografía:* En este recuadro se muestra la reconstrucción topográfica del objeto, es decir; los niveles de grises tienen un valor de altura asociado.
4. *Mov Piezo:* En este panel se controla el dispositivo piezo eléctrico (PTZ), aquí se puede elegir el rango en que se debe desplazar el PTZ para que el patrón de interferencia recorra toda la región de interés, y el paso en que se hará el barrido axial. Cabe resaltar que fue necesaria la manipulación de las librerías internas del entorno grafico propio del PTZ proporcionado por *Edmund optics* ya que era imposible manejar desde el GUI de *Matlab*.

5. *Perfil Interferométrico*: Aquí se muestra las intensidades para un solo pixel registradas en el barrido axial, este recuadro puede brindar información de la calidad del registro del patrón de interferencia de la muestra.
6. *Perfil XZ y Perfil YZ*: En estos paneles se muestra un perfil reconstruido de la muestra tanto vertical como horizontalmente.
7. *Métodos de localización del pico de coherencia*: en este recuadro es posible elegir el método para reconstruir la muestra luego del proceso de toma de datos.
8. *Ver y Salir*: El botón ver permite visualizar parámetros y características de reconstrucciones guardadas anteriormente, y en botón salir desconecta la cámara, el PTZ y cierra la interfaz.

Figura 6-10: Interfaz gráfica para controlar el microscopio perfilométrico por interferometría de luz cuasi-monocromática.



Paralelamente se diseña un software construido para controlar el proceso de captura del cámara sincronizado con el desplazamiento del PTZ y aplicar los métodos de interferometría por luz cuasi-monocromática. Para este caso, como no es necesario un gran volumen de información, la reconstrucción se hace inmediatamente después de la captura de datos. La interfaz se muestra en la Figura 5-10. A diferencia de la interfaz para luz blanca, aquí con el pop-up menú del panel indicado en la Figura con el número 4. Se puede elegir los métodos de *Phased Shifting* a 4 o 5 imágenes y aplicarse inmediatamente después de la captura de datos. A continuación, se describen cada uno de los óvalos rojos señalados en la Figura 5-10.

1. *Cámara*: Esta ventana muestra lo que está captando la cámara en tiempo real, además se usa para mostrar la imagen que veía la cámara al momento de tomar los datos, y con el recuadro rojo señala la zona reconstruida.
2. *3D*: Aquí se muestra la reconstrucción tridimensional del objeto luego de procesado los datos.
3. *Topografía*: En este recuadro se muestra la reconstrucción topográfica del objeto, es decir. Los niveles de grises tienen un valor de altura asociado.

4. *Perfil Interferométrico*: Aquí se muestra las intensidades para un solo pixel registradas en el barrido axial después del proceso de calibración. En este proceso se puede determinar en nanómetros la distancia equivalente en valores de fase a 2π . Esto permite determinar que distancia debe desplazarse el PTZ para capturar las intensidades en cada desfase exigido por el método de *Phase Shifting* elegido en particular.
5. *Mov Piezo*: En este panel se controla el dispositivo piezo eléctrico (PTZ), aquí se puede desplazar el PTZ para que el patrón de interferencia tenga el mayor contraste posible. El pop-up menú permite seleccionar le método de reconstrucción a aplicar y el paso queda determinado por la calibración y el método.
6. *Perfil XZ y Perfil YZ*: En estos paneles se muestra un perfil reconstruido de la muestra tanto vertical como horizontalmente.
7. *Ver y Salir*: El botón ver permite visualizar reconstrucciones anteriores, y en botón salir desconecta la cámara, el PTZ y cierra la interfaz.

6.3 CALIBRACIÓN

6.3.1 Calibración del espacio visual

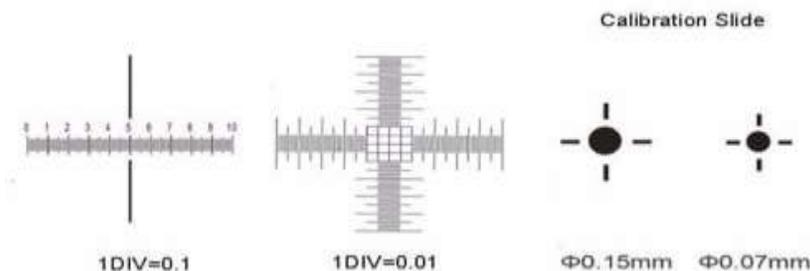
La resolución de una imagen indica la cantidad de detalles que puede observarse en esta. La cámara CMOS usada en este trabajo tiene una resolución por defecto de 752 x 480, es decir 752 píxeles de ancho, por 480 píxeles de alto. Entonces, en este caso la imagen está compuesta de 360.960 píxeles. Como el objetivo es dar información precisa acerca del tamaño real de la muestra, no solo en alturas, sino también el área de la zona reconstruida, es necesario calcular el tamaño equivalente de un pixel.

Un píxel es la menor unidad homogénea en color que compone una imagen digital, es un concepto inmaterial que no tiene una medida concreta. Por lo tanto, la resolución mide la cantidad de píxeles que contiene una imagen y establece la relación entre las dimensiones digitales y las físicas. En definitiva, a mayor número de píxeles por unidad de longitud, mayor concentración de puntos en menos espacio, y por lo tanto mayor calidad de imagen.

Para encontrar el tamaño del pixel, se utilizó la regleta de calibración mostrada en la Figura 5-11. De manera que el tamaño del pixel se puede calcular de la siguiente forma:

$$\text{TAMAÑO PIXEL} = \frac{\text{TAMAÑO DEL CAMPO VISUAL}}{\text{NUMERO DE PÍXELES}} \quad (5.3.1)$$

Figura 6-11: Regleta de Calibración.

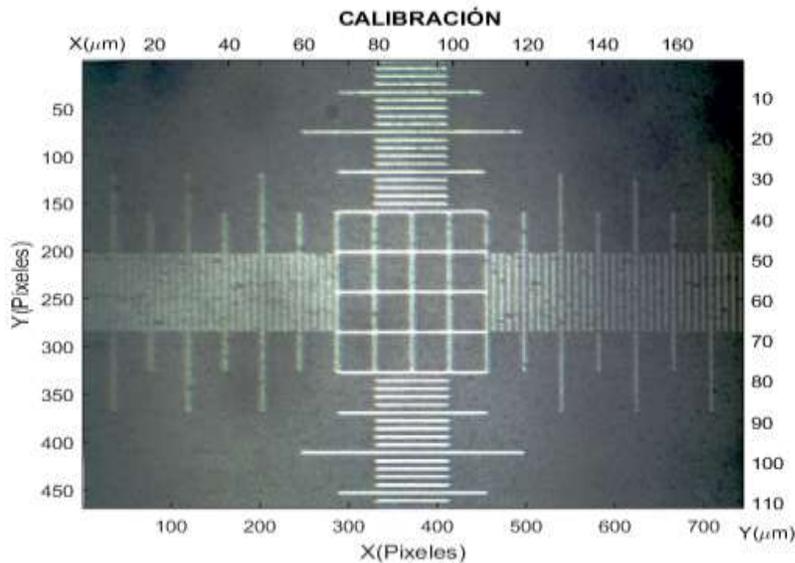


En la Figura 5-12 se pueden observar las líneas calibradas de la regleta en la zona de observación del microscopio perfilométrico, cada división tiene un valor de 0.01mm (Figura 5-11), se puede verificar que el tamaño total en el eje x es de 178 μm y en el eje y es de 112 μm . Por lo tanto:

$$\text{TAMAÑO PIXEL EJE X} = \frac{178 \mu\text{m}}{744} = 0,24 \mu\text{m}$$

$$\text{TAMAÑO PIXEL EJE Y} = \frac{112 \mu\text{m}}{469} = 0,24 \mu\text{m}$$

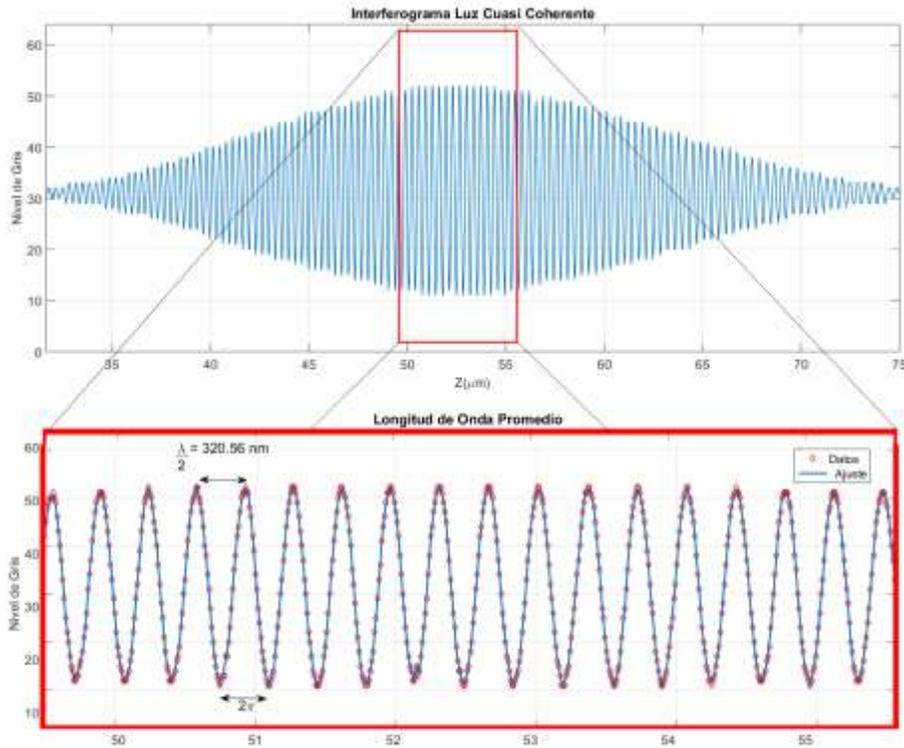
Figura 6-12: Regleta de calibración observada por la cámara del microscopio perfilométrico.



6.3.2 Determinación de la longitud de onda experimental del patrón de interferencia para luz cuasi-monocromática:

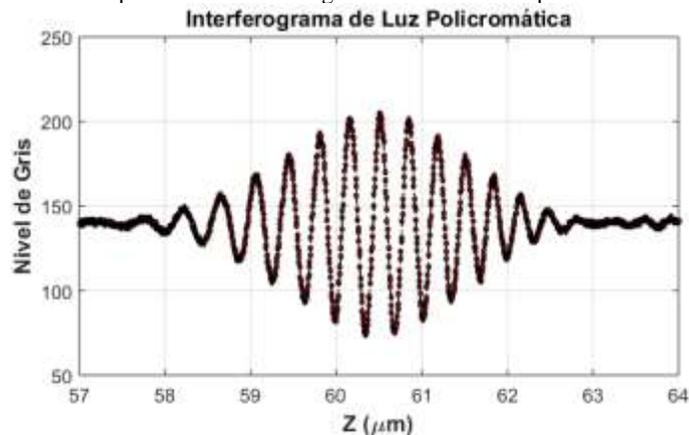
Usando el software diseñado en Matlab que controla la cámara CMOS y el PTZ y con la ayuda del desplazador de paso fino adaptado a la muestra (espejo), se localiza la zona donde existe interferencia con el mayor contraste posible. Luego, con la ayuda del PTZ se realiza un barrido axial y se capturan los valores de intensidad correspondiente a un pixel a pasos de 10 nm en un rango que permita barrer toda la zona de interferencia, se guardan los valores de intensidad correspondientes a cada posición del PTZ y se procede a realizar un ajuste sinusoidal al patrón de interferencia la zona señalada en el recuadro rojo de la Figura 5-12. Se calcula la distancia entre cada cresta (longitud de onda), que en valores de fase equivale a 2π , a partir de la frecuencia obtenida en el ajuste sinusoidal, obteniendo así, el valor experimental de la longitud de onda promedio de la luz cuasi-monocromática capturada por la cámara luego de interferir. La Figura 5-13 muestra el interferograma obtenido en el proceso de calibración, así como la longitud de onda promedio calculada.

Figura 6-13: Calibración para determinar la longitud de onda promedio de la luz cuasi coherente luego de interferir.



Por medio del ajuste de mínimos cuadrados se obtuvo una longitud de onda de la luz cuasi coherente después de interferir fue de 320.56 nm esta distancia equivale en valores de fase a 2π . La desviación estándar de la parte gaussiana (evolvente) de la ecuación que determina el comportamiento general en toda la zona de interferencia (Figura 5-13) es útil para calcular longitud de coherencia de la fuente de luz cuasi monocromática, esta es de aproximadamente $40\mu\text{m}$. El mismo procedimiento (Figura 5-14) se hace para calcular la longitud de coherencia de la luz policromática escogiendo un paso para el PTZ de 5nm . La Longitud de coherencia calculada es de $4,3\mu\text{m}$ y la longitud de onda de la luz policromática después de interferir fue de 360nm .

Figura 6-14: Calibración para determinar a longitud de coherencia experimental de la luz policromática



RESULTADOS

El microscopio perfilométrico por interferometría óptica construido permitió obtener resultados de varias superficies, por medio de interferometría de luz blanca y por interferometría de luz cuasi-monocromática, en cada una de estas se implementó varios algoritmos: Detección de máximo o mínimos, Máximo de la envolvente y Localización por valores de fase para luz policromática y Phase Shifting a 4 y 5 imágenes para luz cuasi-monocromática. Los datos se filtraron para evitar el ruido y se suavizaron en el plano xy , también se implementó un algoritmo de rotación de la matriz reconstruida para una mejor apreciación. En este capítulo se muestran los resultados obtenidos del levantamiento topográfico con el microscopio perfilométrico construido; para varios objetos y mediante las diferentes técnicas y algoritmos. Así mismo, se realiza un análisis comparativo de los resultados.

7.1 RECONSTRUCCIONES Y COMPARACIONES

7.1.1 Microscopio perfilométrico por interferometría de luz blanca.

En este caso se reconstruyeron tres muestras: una nanoestructura en forma de escalón, cierta región de una micro lente de Fresnel y cierta parte de una esfera metalizada.

En la Figura 6-1 se muestran las vistas superiores de cierta región de una esfera aplicando los métodos de interferometría de luz policromática por los métodos de Detección de mínimos (Figura 6-1 (a)), Máximo de la envolvente (Figura 6.1(b)) y Localización por valores de fase (Figura 6-1 (c)). En este caso no fue posible hacer una reconstrucción de una zona más amplia debido a las limitaciones del dispositivo; en particular, a los alrededores de la zona reconstruida la inclinación del objeto hace que las franjas se aprietan lo suficiente para no distinguir una de otra.

Figura 7-1: Vistas superiores de cierta región de una esfera metalizadas por los métodos de a) Detección de mínimos, b) Máximo de la Envolvente y c) Localización por valores de fase.

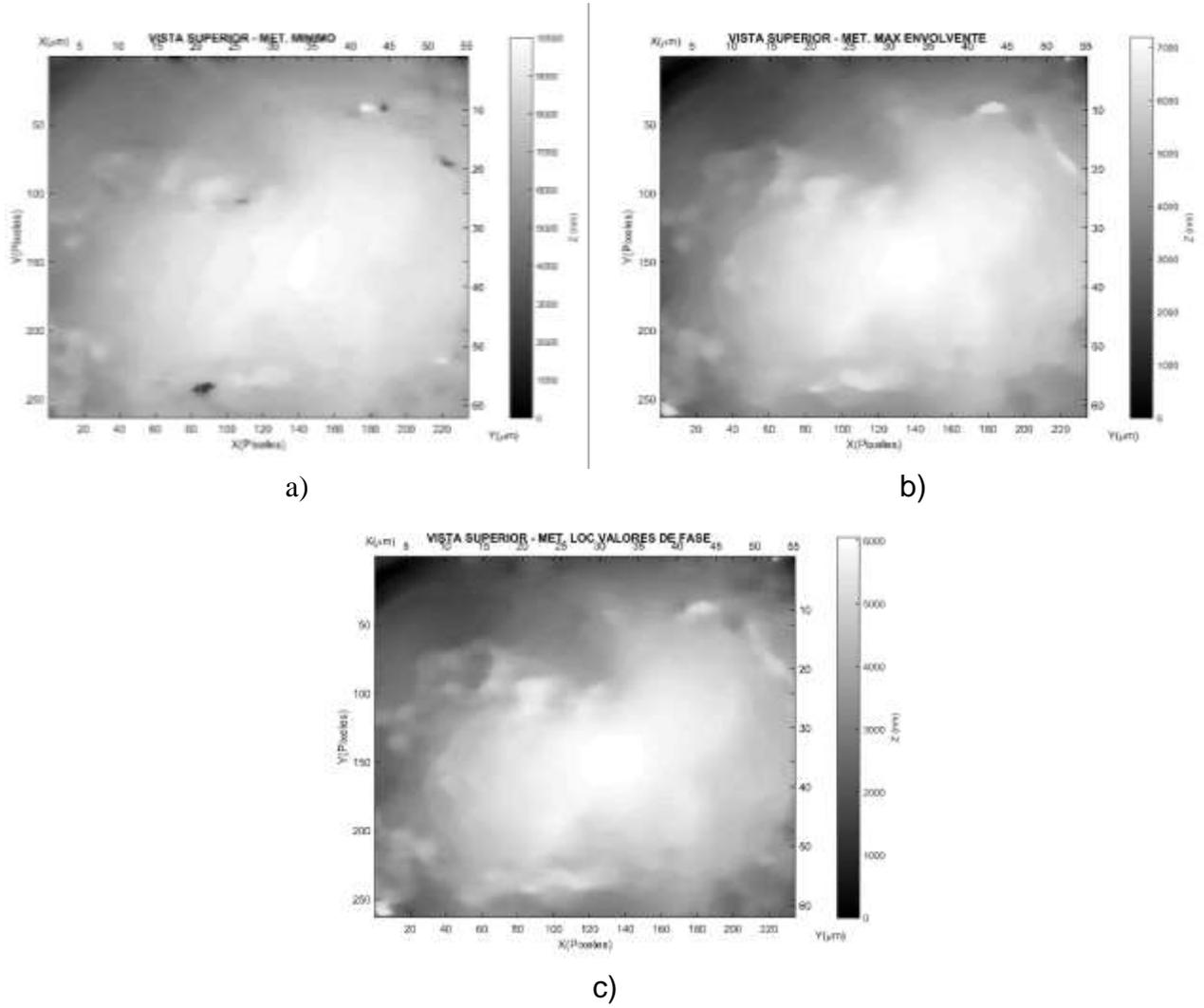
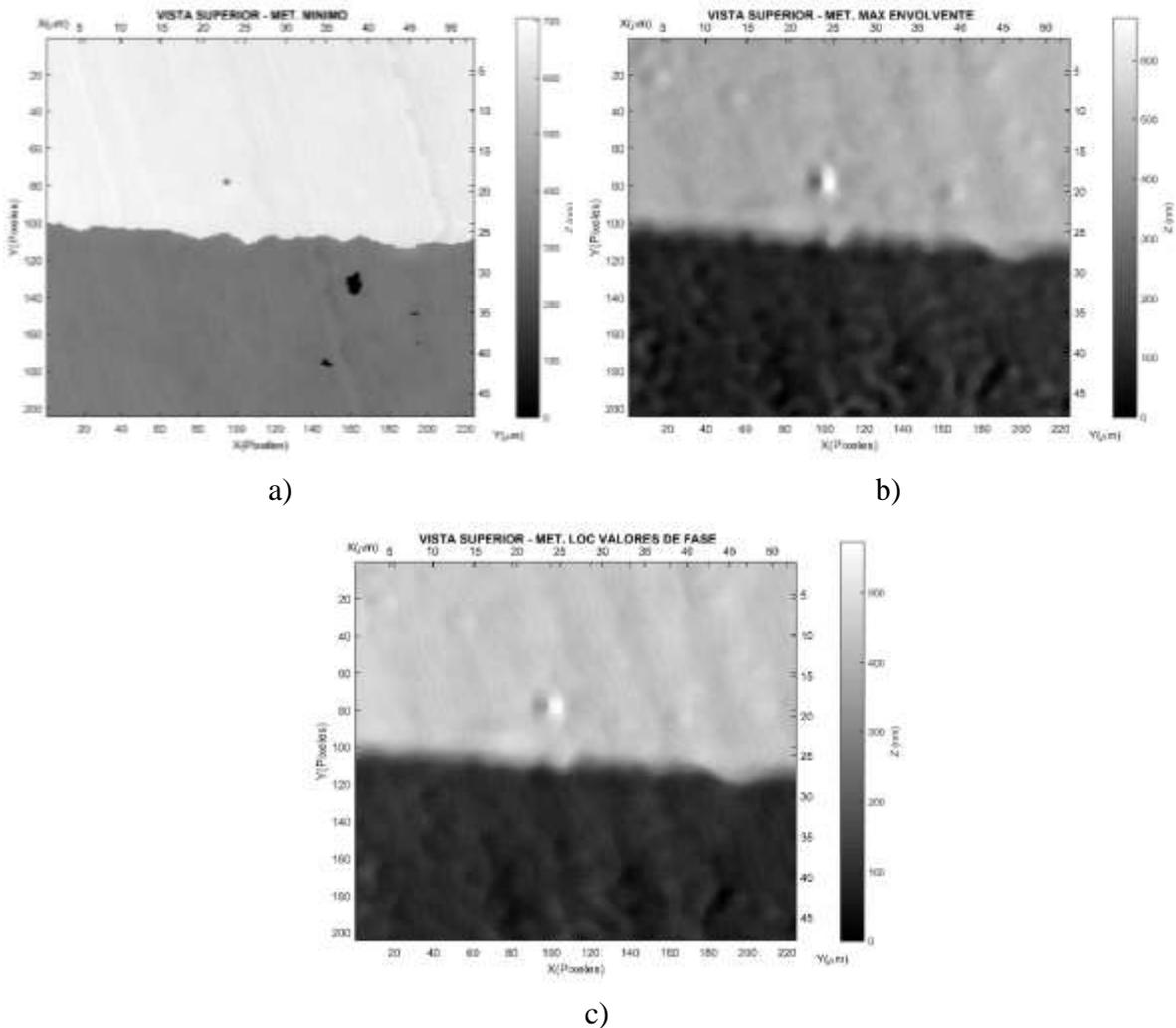
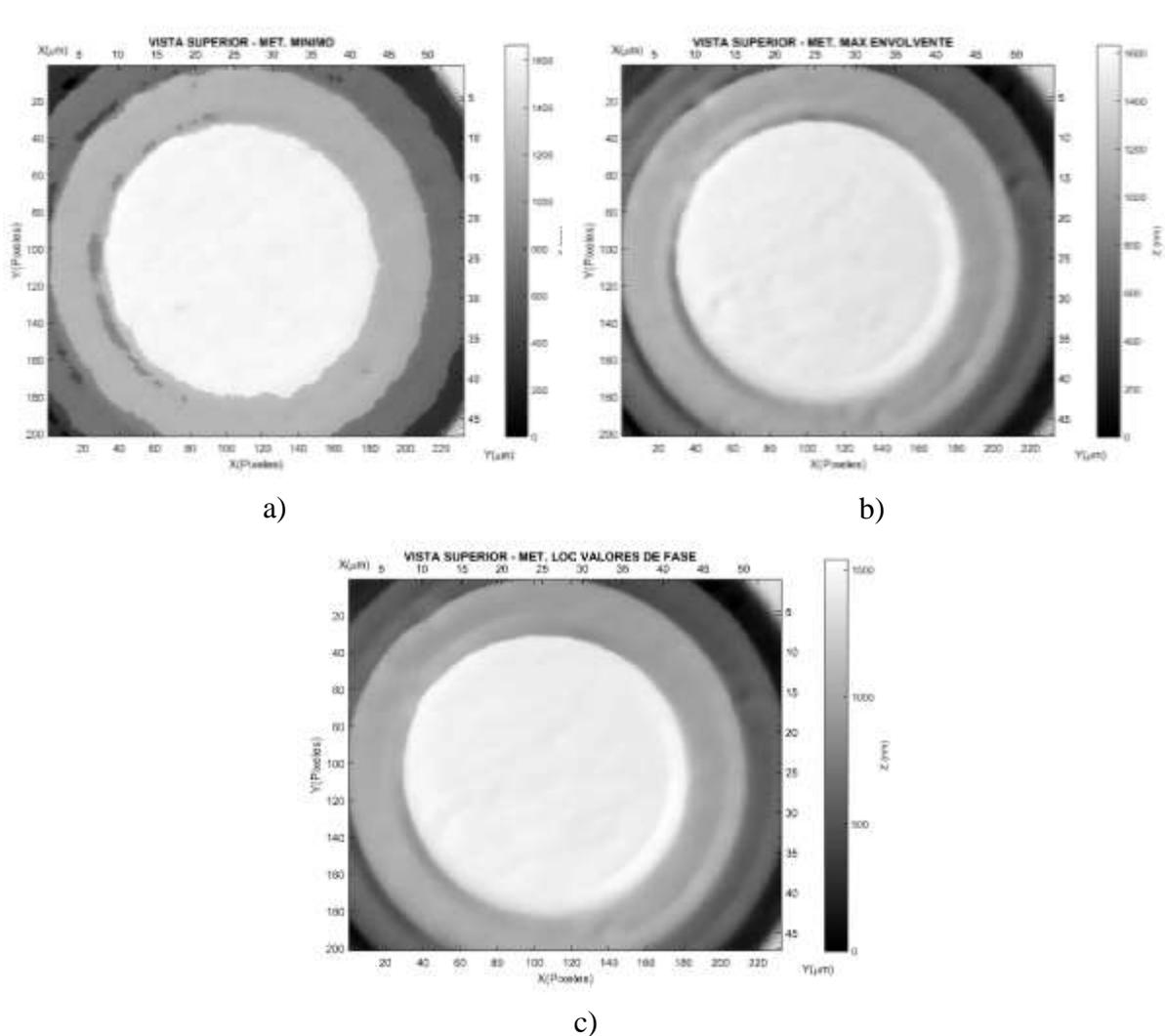


Figura 7-2: Vistas superiores de una nanoestructura en forma de escalón por los métodos de a) Detección de mínimos, b) Máximo de la Envolvente y c) Localización por valores de fase.



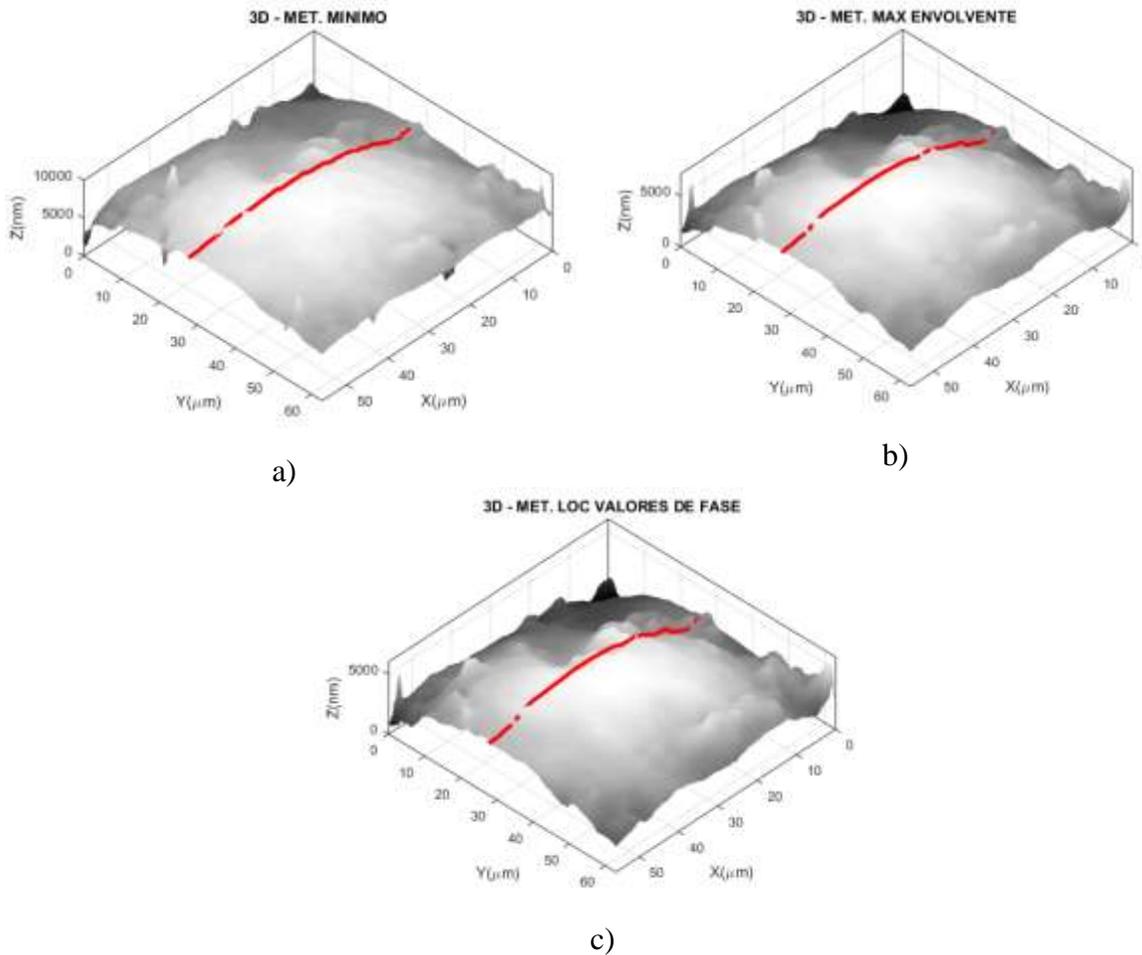
En la Figura 6-2 se muestran las vistas superiores de una nanoestructura en forma de escalón, se demuestra que el microscopio perfilométrico por interferometría de luz policromática funciona eficazmente para saltos de altura, siempre y cuando toda la zona reconstruida sea barrida axialmente existiendo interferencia. La Figuras 6-2 (a), 6-2 (b) y 6-3 (c) muestran las reconstrucciones de la nanoestructura en forma de escalón obtenidas por los métodos de Detección de mínimos, Máximo de la envolvente y Localización por valores de fase respectivamente. En este caso, el tamaño de la zona reconstruida depende del volumen de la información que será tratada computacionalmente. Es decir; a pesar que en todo el espacio es posible obtener franjas (742 x 480 píxeles), el costo computacional es muy elevado. Por lo que se selecciona una zona de menor tamaño.

Figura 7-3: Vistas superiores de cierta región de una micro lente de Fresnel por los métodos de a) Detección de mínimos, b) Máximo de la Envolvente y c) Localización por valores de fase.



Las vistas superiores de cierta zona de una micro lente de Fresnel obtenidas por los métodos de Detección de Mínimos, Máximo de la Envolvente y Localización por valores de fase se muestran en la Figura 6-3 (a), (b) y (c) respectivamente. Las diferencias de altura de cada salto de la lente superan los 320nm, razón por la cual no fue posible aplicar los métodos de luz cuasi coherente para este objeto debido a que los saltos de altura superan la resolución axial de dichos métodos.

Figura 7-4: Vistas 3D de cierta región de una esfera metalizada por los métodos de a) Detección de mínimos, b) Máximo de la Envolvente y c) Localización por valores de fase.



En la Figura 6-4 (a), (b) y (c) se muestran las reconstrucciones tridimensionales de cierta región de la esfera metalizada mencionada anteriormente por los métodos de Detección de mínimos, Máximo de la envolvente y Localización por valores de fase. En la Figura 6-5 se muestra la comparación de los tres métodos adaptados en el microscopio perfilométrico con luz policromática para la esfera, usando solo un perfil de las reconstrucciones obtenidas. Como se aprecia en la Figura, en la parte inicial los tres perfiles coinciden perfectamente, y al final parecen tener diferentes alturas. Esto se debe a que después de realizada la reconstrucción por cada uno de los métodos, los perfiles se reajustan para que su punto de mínimo de altura empiece en cero. Además, el algoritmo de rotación mencionado al inicio de este capítulo funciona con criterios manuales, es decir; depende de la apreciación del ojo humano. Lo que hace que la inclinación de cada uno de los perfiles no sea la misma.

Figura 7-5: Comparación de los tres métodos con luz policromática para la esfera.

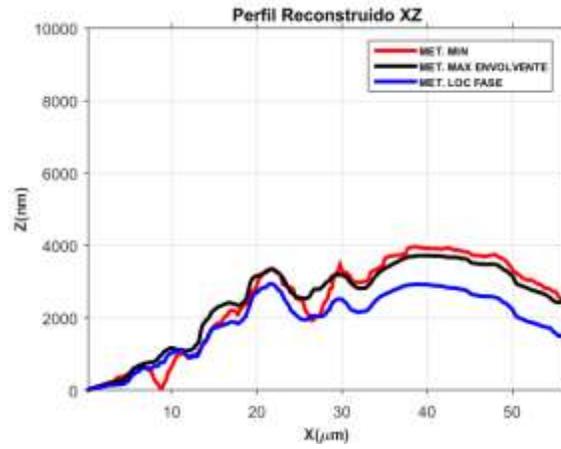
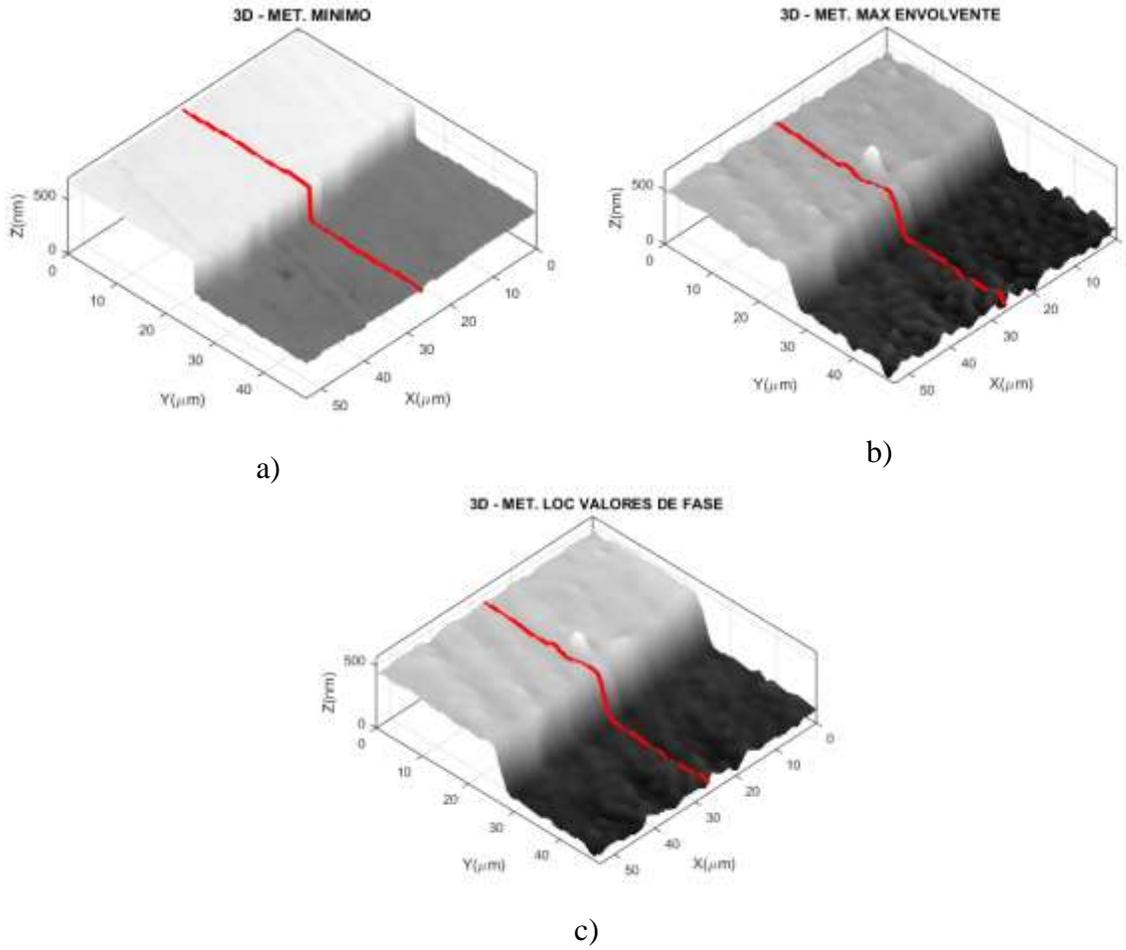
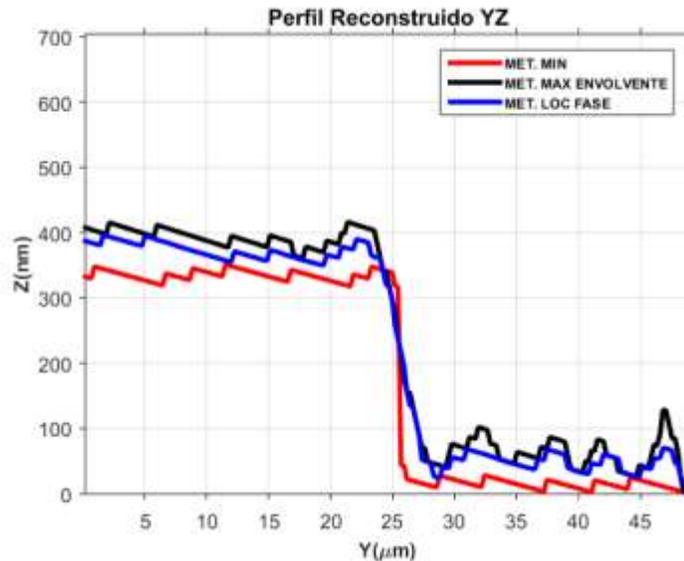


Figura 7-6: Vistas 3D de una nanoestructura en forma de escalón por los métodos de a) Detección de máximos, b) Máximo de la Envolvente y c) Localización por valores de fase.



En la Figura 6-6 (a), (b) y (c) se aprecian las reconstrucciones tridimensionales de la nanoestructura en forma de escalón, es posible apreciar que dicho escalón tiene una altura aproximada de 300 nm. Esta nanoestructura es una película de Nitruro de Titanio obtenida por deposición de iones de vapor y cuyo método de caracterización es descrito por Lara (2011) .

Figura 7-7: Comparación de los métodos para la nanoestructura en forma de escalón.



La Figura 6-7 muestra una comparación de los perfiles bidimensionales para la nanoestructura en forma de escalón. Todos los perfiles fueron ajustados para que su altura mínima fuera cero. En este caso las inclinaciones obtenidas luego de aplicar el algoritmo de rotación fueron muy parecidas por lo que es difícil apreciar diferencias. En la Figura 6-8 (a), (b) y (c) se muestran las reconstrucciones tridimensionales de la micro lente de Fresnel obtenidas por los métodos de Detección de mínimos, Máximo de la envolvente y Localización por valores de fase respectivamente. Al igual que para el caso de la nanoestructura en forma de escalón, la zona reconstruida está limitada por el costo computacional. Esta misma lente fue reconstruida en el trabajo de Arias (2015). Desde el punto de menor altura hasta el punto más alto de la lente hay aproximadamente 1.2 micras, y al estar conformada por tres saltos de altura, cada tramo tiene aproximadamente 400nm. En la Figura 6-9 Se muestran la comparación de los perfiles para la micro lente de Fresnel obtenidas por los tres métodos de perfilometría por interferencia de luz policromática.

Figura 7-8: Vistas 3D de cierta zona de una micro lente de Fresnel por los métodos de a) Detección de máximos, b) Máximo de la Envolvente y c) Localización por valores de fase.

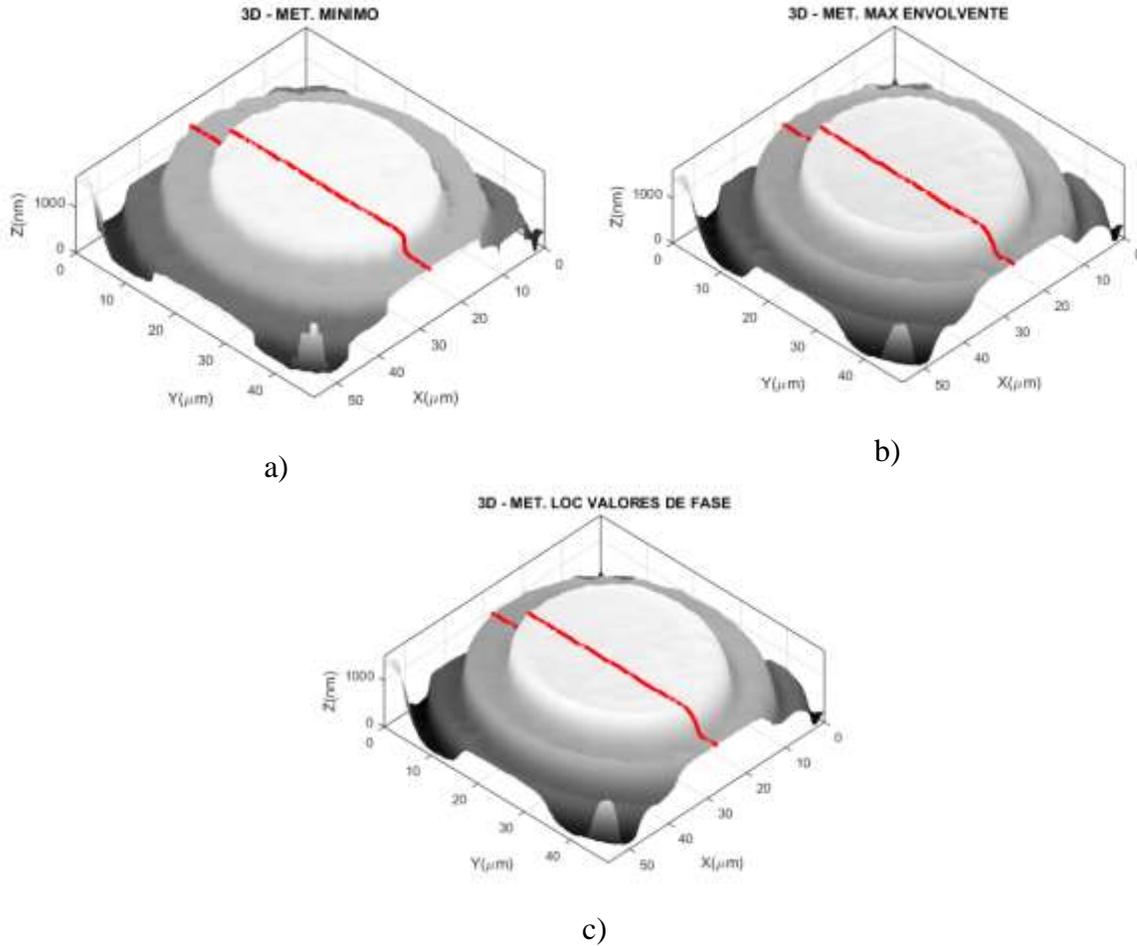
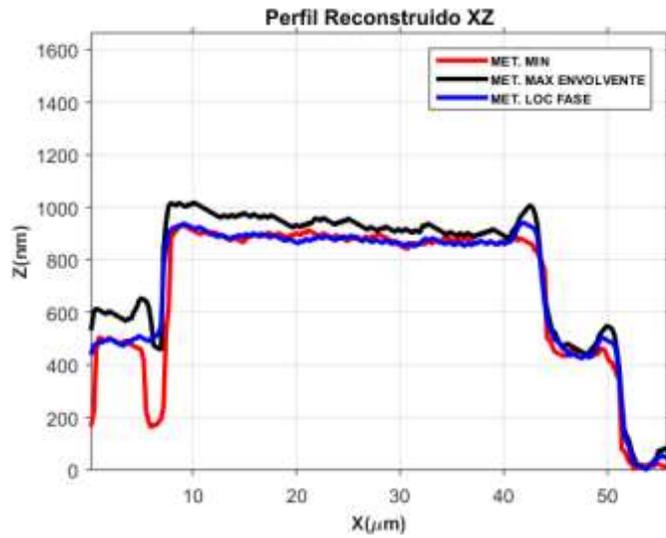


Figura 7-9: Comparación de los métodos para la micro lente de Fresnel.



7.1.2 Microscopio perfilométrico por interferometría de luz cuasi-monocromática.

Para este caso fue posible reconstruir la nanoestructura en forma de escalón y cierta parte de una esfera metalizada. En la Figura 6-10 (a) y (b) se muestran las vistas superiores para los métodos de perfilometría con interferencia de luz cuasi-monocromática. Es decir; los métodos de Phase Shifting a 4 y 5 imágenes respectivamente. Las vistas 3D de la nanoestructura en forma de escalón se muestran en La Figura 6-10 (c) y (d). En ambos casos se observa ciertas oscilaciones que no pertenecen a las características de la muestra. Dichas oscilaciones que tienden a comportarse similares a las franjas de interferencia producidas al momento de la reconstrucción, se deben al comportamiento no lineal del PTZ. Es decir; para que los métodos de Phase Shifting funcione correctamente, las posiciones en la que se toman cada imagen necesaria para calcular la fase deben ser muy precisas. A pesar de que se realiza un proceso de calibración (Sección 5.3.2) para calcular dichas posiciones, el PTZ presenta cierta histéresis que se vuelve apreciable por las dimensiones de la muestra.

Figura 7-10: Reconstrucción de la nanoestructura en forma de escalón para los métodos de interferometría de luz cuasi-monocromática, a) vista superior PS4, b) vista superior PS5 c) vista 3D PS4 y d) vista 3D PS5.

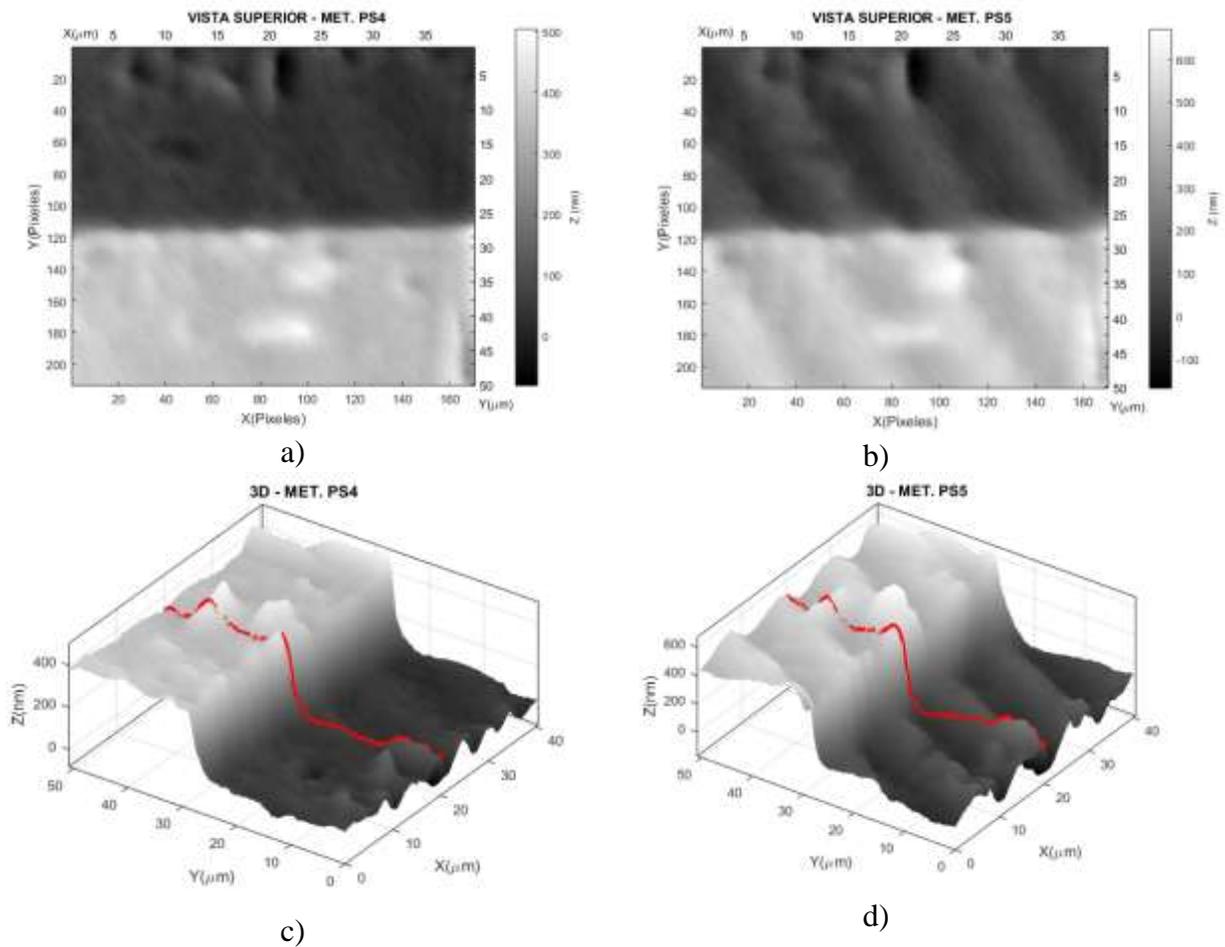
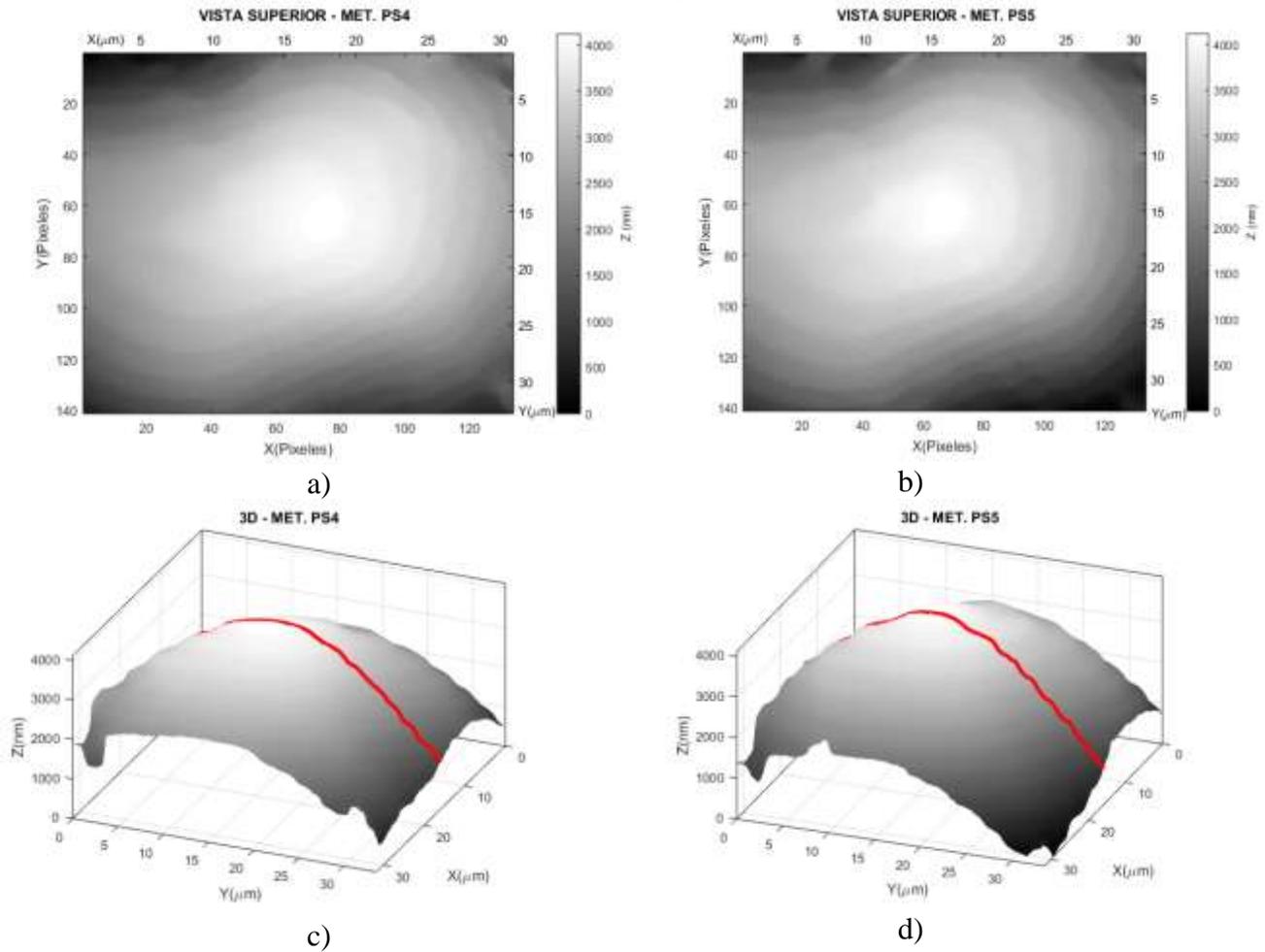


Figura 7-11: Reconstrucción de cierta región de una esfera metalizada para los métodos de interferometría de luz cuasi-monocromática, a) vista superior PS4, b) vista superior PS5 c) vista 3D PS4 y d) vista 3D PS5.

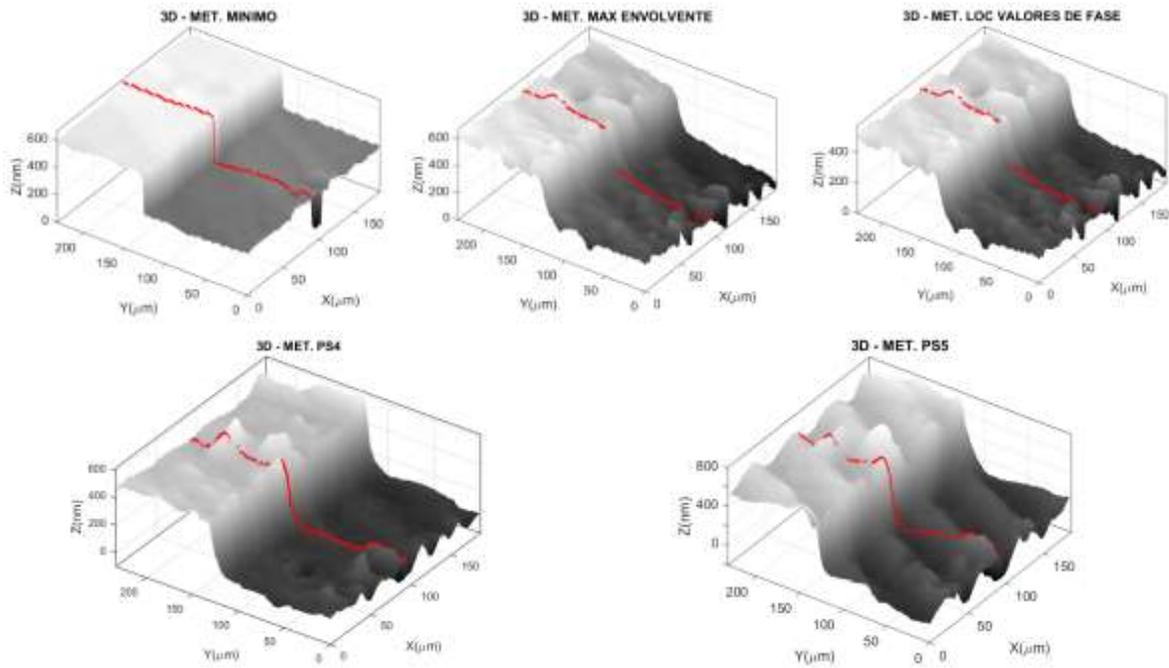


La Figura 6-11 se muestran las reconstrucciones de cierta parte de una esfera metalizada usando el microscopio perfilométrico por interferometría de luz cuasi-monocromática. En la Figura 6-11 a) y c) se muestran la topografía y la reconstrucción tridimensional por el método de Phase Shifting a 4 imágenes respectivamente, y en b) y d) las correspondientes a el método de Phase Shifting a 5 imágenes.

7.1.3 Comparación Interferometría de luz policromática vs interferometría de luz cuasi-monocromática.

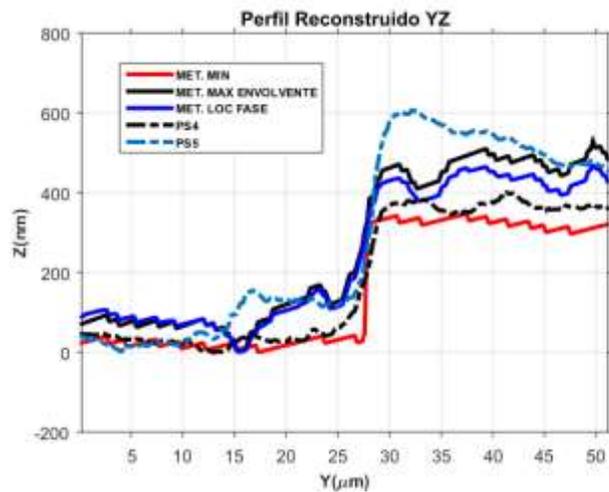
Para comparar los métodos por interferometría de luz policromática con los de luz cuasi coherente, se eligió una zona en común de la nanoestructura en forma de escalón y se procedió a aplicar todos los métodos a esta misma zona. En la Figura 6-12 se ven las reconstrucciones 3D para la nanoestructura por cada uno de los métodos.

Figura 7-12: Comparación entre los métodos de interferometría de luz policromática y de luz cuasi monocromática



En la Figura 6-13 se puede observar la comparación entre uno perfiles por los diferentes métodos aplicados.

Figura 7-13: Comparación de los perfiles reconstruidos para la nano estructura en forma de escalón por los diferentes métodos aplicados.

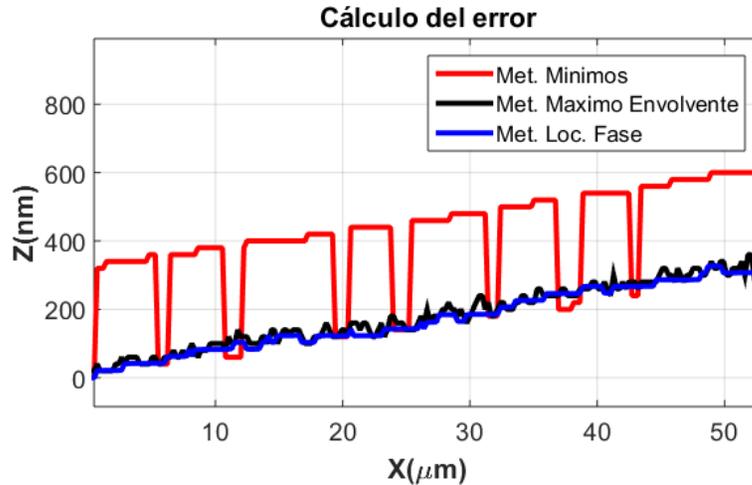


7.2 ANÁLISIS DEL ERROR

7.2.1 Microscopio perfilométrico por interferometría de luz policromática.

Para una apreciación de la incertidumbre del método se usa un espejo y se asume como un plano perfecto. Se calcula la desviación estándar de éste con respecto a la topografía obtenida con cada caso. El plano que representa el espejo es obtenido mediante un ajuste por mínimos cuadrados. La reconstrucción topográfica de mejor comportamiento es la del método de Localización por valor de fase, con una desviación estándar de 9.5 nm, seguida del método de localización del máximo de la envolvente con una desviación estándar de 14.4 nm y el de más bajo desempeño fue el método de Detección del mínimo del interferograma, con 23.8 nm de desviación estándar. Esto teniendo en cuenta que la matriz de interferogramas captadas por la cámara se registró a pasos de 20nm. En la Figura 6-14 se muestra un perfil de las reconstrucciones del espejo por el método de detección del mínimo, detección del máximo de la envolvente y localización por valores de fase respectivamente.

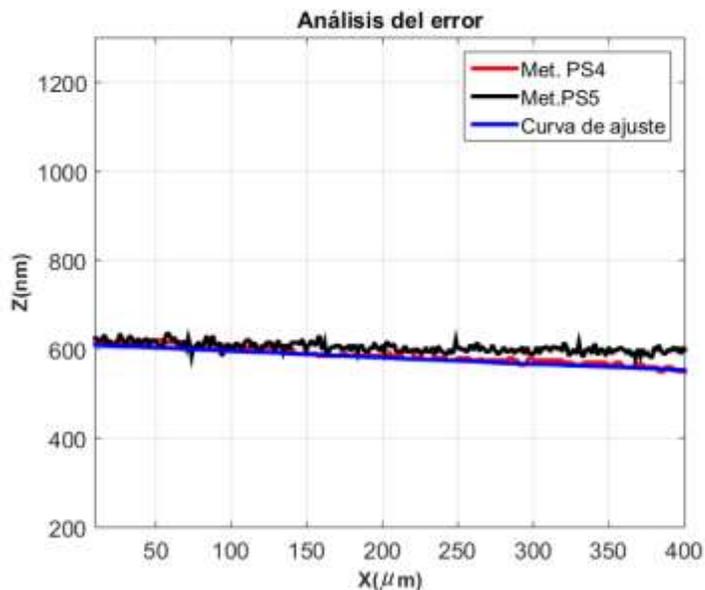
Figura 7-14: Análisis del error para los métodos de luz policromática.



7.2.2 Microscopio perfilométrico por interferometría de luz cuasi-monocromática.

Para los métodos de luz cuasi-monocromática la estimación del se realizó de manera similar que el caso anterior. Se calculando la desviación estándar de éste con la topografía obtenida con cada caso. El plano que representa el espejo es obtenido mediante un ajuste por mínimos cuadrados. La reconstrucción topográfica de mejor comportamiento es la del método de PSI a cinco imágenes, con una desviación estándar de 9.0 nm, y el método de PSI a 4 imágenes mostró una desviación estándar de 17.5nm. La principal fuente de error son las vibraciones externas y la histéresis propia del PTZ. En la Figura 6-15 se muestra un perfil de las reconstrucciones del espejo por el método de *Phase Shifting* a cuatro y a 5 imágenes, también se muestra el perfil del espejo obtenido por mínimos cuadrados.

Figura 7-15: Análisis del error para los métodos de Luz cuasi-monocromática



7.3 OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES

En este trabajo, se implementó un microscopio perfilométrico por interferometría óptica y se aplicaron métodos que obtuvieron muy buenos resultados. Sin embargo, debido a ciertas limitaciones, como, por ejemplo, la no disposición de muestras cuyas topografías estén verificadas y validadas, es necesario realizar un proceso de validación de los resultados y de la implementación del dispositivo. El diseño del dispositivo facilita la inserción de otras metodologías de microscopía como lo son: la microscopía por contraste de fase, microscopía con focal y microscopía de contraste por interferencia diferencial (DIC). Esto permitiría seguir formando profesionales en el área de metrología óptica y en particular en el área de diseño y construcción de dispositivos ópticos.

Para el caso de interferometría con luz policromática es recomendable implementar métodos que puedan ser procesados en tiempo real, ya que el método de Máximo de la envolvente y el de Localización por valores exige una compilación completa de los datos antes de poder empezar a procesarse para obtener los resultados.

Posibles trabajos futuros pueden incluir la determinación del espesor de estructuras independientes o no, del índice de refracción. Una combinación de análisis de espectro con interferometría de luz blanca es un enfoque posible para este problema, ya que el análisis de espectro puede obtener el índice de refracción, que se usa para determinar el grosor en la interferometría de luz policromática.

CONCLUSIONES

Se diseñó, construyó un microscopio perfilométrico por interferometría de luz policromática o luz blanca, e interferometría de luz cuasi monocromática, completamente funcional, que permite la reconstrucción topográfica de objetos escala nanométrica.

Se implementó varios algoritmos o técnicas de reconstrucción topográfica, unos por interferometría de luz policromática: detección de máximos o mínimos, por localización del máximo de la envolvente y por localización de fase, y otros por interferometría por luz cuasi-monocromática: *Phase shifting* a 4 y 5 capturas.

Se desarrolló un nuevo algoritmo basado la sensibilidad de la fase (localización de la fase) al desplazamiento para el análisis de franjas de interferencia en la exploración axial de interferometría de luz policromática. La novedad de la técnica radica en el aumento de la resolución axial, ya que hace posible aumentar la resolución del muestreo hasta aproximadamente 1000 posiciones o más. La desventaja del método es el costo computacional y su dependencia de la longitud de onda obtenida en el interferograma, sin embargo, sigue siendo un método eficaz para analizar patrones de franjas ruidosas.

Se elaboró una interface de usuario en MATLAB de fácil uso y de ambiente de interacción amigable que permite:

- ✓ El control automático del sistema de desplazamiento axial (piezo - PTZ), la captura y almacenamiento de las imágenes, la sincronización de la cámara y el PTZ, la calibración del desplazamiento axial, del campo visual de trabajo, la selección y aplicación de alguno de las técnicas de reconstrucción implementadas y la visualización de la reconstrucción tridimensional calculada.
- ✓ La visualización en tiempo real de la muestra, de las franjas del patrón de interferencia, si se encuentra en el rango de la longitud de coherencia de la fuente.
- ✓ La reconstrucción tridimensional de la superficie de los objetos y sus perfiles topográficos por las distintas técnicas implementadas: detección de máximos o mínimos, localización del máximo de la envolvente, localización de valores de fase, *Phase Shifting* a 4 y 5 capturas.

Se reconstruyó la topografía de la superficie de varios objetos con detalles de alturas máximas entre 300nm y 1.1 micrómetros. Los objetos reconstruidos son: parte de una esfera reflectiva, parte de una lente de Fresnel y parte de un escalón metálico.

El microscopio perfilométrico construido, permite reconstruir objetos en un campo de observación máximo de $827 \mu m$ x $528 \mu m$. Con:

- ✓ Una resolución de 0.1 nm para las técnicas de *Phase Shifting* y un error de 9nm para el método de *Phase Shifting* a 5 imágenes, y de 17,5nm para *Phase Shifting* a 4 imágenes en un rango máximo de trabajo 322nm si se presentan cambios abruptos y de aproximadamente 10 micrómetros cuando los cambios de alturas son suaves.
- ✓ Una resolución de 20nm y error de 9,5nm, 14,4nm y 23,8. Para las técnicas de Localización de valores de fase, localización del máximo de la envolvente y detección de máximos respetivamente y un rango máximo de trabajo de 100 micrómetros.

Este tipo de sistema posee limitaciones, como:

- ✓ La no movilidad del sistema, ya que este es un sistema de tipo fijo, esto quiere decir que no se pueden realizar reconstrucciones a objetos en movimiento y objetos de gran tamaño.
- ✓ El sistema es susceptible a la introducción de errores del medio, este es muy sensible al ruido mecánico. Entonces, es necesario que el dispositivo esté en una base que aisle las vibraciones mecánicas del medio.
- ✓ Es necesario elegir adecuadamente el paso del muestreo y la intensidad luminosa, debido a esto puede presentarse errores al momento de implementar los algoritmos correspondientes a interferometría de luz policromática. El paso siempre debe estar por debajo de la longitud de onda promedio, y la intensidad luminosa de la lampara LED debe tener el balance correcto para producir un buen contraste en el interferograma, sin saturar la cámara.
- ✓ Las muestras que se desean reconstruir topográficamente deben tener un alto grado de reflectividad, de tal forma, que se logren un alto contraste de las franjas. En el caso se los métodos de *Phase Shifting*, las muestras no deben poseer saltos de altura superiores a media longitud de onda del haz, esto se conoce como el problema de ambigüedad de la fase.
- ✓ La técnica de reconstrucción topográfica de luz policromática, requieren de adquirir un alto volumen de información, la cual es necesaria para obtener la reconstrucción, esto repercute en: gran consumo de tiempo en la adquisición, demanda de recursos de hardware y tiempo de computo para la obtención del resultado final.

La construcción del microscopio perfilométrico muestra una gran capacidad para la inspección no destructiva de microcomponentes, obteniendo información topográfica con resolución del orden de los nanómetros. En la configuración de iluminación de luz blanca o policromática, se puede inspeccionar superficies con un grado alto de reflectividad, con alta resolución y de alturas desde los nm hasta varias micras. En la configuración de luz cuasi-monocromática también es posible inspeccionar sin contacto, obteniendo información topográfica también con resolución nanométrica y con mayor rapidez.

La construcción de este microscopio perfilométrico permite la inserción de otras técnicas de reconstrucción topográfica por interferometría de luz blanca y luz cuasi-monocromática, lo que conlleva al fortalecimiento de la línea de metrología por perfilometría interferométrica y a la formación de nuevos investigadores en esta rama de la óptica.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Arias-Hernández, N. A., Molina-Prado, M. L., & Meneses-Fonseca, J. E. (2015). A reconstruction of objects by interferometric profilometry with positioning system of labeled target periodic. *Dyna*, 82(190), 153-159.
- Arias, N. A., Meneses, J. E., Suárez, M. A., & Gharbi, T. (2009). Medida de la Orientación, Posición y Desplazamiento en el Plano de un Objeto por Codificación de Fase. *Bistua: Revista de la Facultad de Ciencias Básicas*, 7(2).
- Arlante, J. J. B., & Gómez, A. P. (2010). imágenes de rango de la superficie del ojo de la mosca mediante correlación interferométrica. *ITECKNE*, 7(2), 144-148.
- Balasubramanian, N. (1982). Optical system for surface topography measurement: Google Patents.
- Bruning, J. H., Herriott, D. R., Gallagher, J., Rosenfeld, D., White, A., & Brangaccio, D. (1974). Digital wavefront measuring interferometer for testing optical surfaces and lenses. *Applied Optics*, 13(11), 2693-2703.
- Caber, P. J. (1993). Interferometric profiler for rough surfaces. *Applied Optics*, 32(19), 3438-3441.
- Carré, P. (1966). Installation et utilisation du comparateur photoélectrique et interférentiel du Bureau International des Poids et Mesures. *Metrologia*, 2(1), 13.
- Crane, R. (1969). Interference phase measurement. *Applied Optics*, 8, 345.
- Creath, K. (1985). Phase-shifting speckle interferometry. *Applied Optics*, 24(18), 3053-3058.
- Creath, K. (1988). Phase-measurement interferometry techniques. *Progress in optics*, 26(26), 349-393.
- Cheng, Y.-Y., & Wyant, J. C. (1985). Phase shifter calibration in phase-shifting interferometry. *Applied Optics*, 24(18), 3049-3052.
- Davidson, M., Kaufman, K., Mazor, I., & Cohen, F. (1987). *An application of interference microscopy to integrated circuit inspection and metrology*. Paper presented at the Integrated Circuit Metrology, Inspection, & Process Control.
- de Groot, P., & Deck, L. (1995). Surface profiling by analysis of white-light interferograms in the spatial frequency domain. *Journal of modern optics*, 42(2), 389-401.

- Deck, L., & De Groot, P. (1994). High-speed noncontact profiler based on scanning white-light interferometry. *Applied Optics*, 33(31), 7334-7338.
- Gåsvik, K. J. (2003). *Optical metrology*. John Wiley & Sons.
- Hariharan, P. (2003). *Optical Interferometry, 2e*: Elsevier.
- Heikkila, J., & Silven, O. (1997). *A four-step camera calibration procedure with implicit image correction*. Paper presented at the Computer Vision and Pattern Recognition, 1997. Proceedings., 1997 IEEE Computer Society Conference on.
- Klempner, A. R. (2007). Development of a modular interferometric microscopy system for characterization of MEMS.
- Lara, L., Jerez, M., Morantes, L., Plata, A., Torres, Y., Lasprilla, M., & Zhabon, V. (2011). *Nanocharacterization of TiN films obtained by Ion Vapor deposition*. Paper presented at the Journal of Physics: Conference Series.
- Larkin, K. G. (1996). Efficient nonlinear algorithm for envelope detection in white light interferometry. *JOSA A*, 13(4), 832-843.
- Lee, B. S., & Strand, T. C. (1990). Profilometry with a coherence scanning microscope. *Applied Optics*, 29(26), 3784-3788.
- Meneses-Fabian, C., & Rivera-Ortega, U. (2012). Phase-shifting interferometry by amplitude modulation *Interferometry-Research and Applications in Science and Technology*. InTech.
- Nakadate, S., & Saito, H. (1985). Fringe scanning speckle-pattern interferometry. *Applied Optics*, 24(14), 2172-2180.
- Nakadate, S., Saito, H., & Nakajima, T. (1986). Vibration measurement using phase-shifting stroboscopic holographic interferometry. *Optica Acta: International Journal of Optics*, 33(10), 1295-1309.
- Olszak, A. (2000). Lateral scanning white-light interferometer. *Applied Optics*, 39(22), 3906-3913.
- Robinson, D., & Williams, D. (1986). Digital phase stepping speckle interferometry. *Optics communications*, 57(1), 26-30.
- Sandoz, P. (1996). An algorithm for profilometry by white-light phase-shifting interferometry. *Journal of modern optics*, 43(8), 1545-1554.
- Sandoz, P., Devillers, R., & Plata, A. (1997). Unambiguous profilometry by fringe-order identification in white-light phase-shifting interferometry. *Journal of modern optics*, 44(3), 519-534.

- Sandoz, P., Zeggari, R., Froehly, L., Pretet, J. L., & Mougin, C. (2007). Position referencing in optical microscopy thanks to sample holders with out-of-focus encoded patterns. *Journal of Microscopy*, 225(3), 293-303.
- Sathiamoorthy, K., & Ahmed, T. (2011). Construction and Validation of a White Light Interferometer.
- Schwider, J. (1990). IV advanced evaluation techniques in interferometry *Progress in optics* (Vol. 28, pp. 271-359): Elsevier.
- Stetson, K. A., & Brohinsky, W. R. (1988). Fringe-shifting technique for numerical analysis of time-average holograms of vibrating objects. *JOSA A*, 5(9), 1472-1476.
- Takeda, M., Ina, H., & Kobayashi, S. (1982). Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry. *JosA*, 72(1), 156-160.
- Török, P., & Kao, F.-J. (2007). *Optical imaging and microscopy: techniques and advanced systems* (Vol. 87): Springer.
- Windecker, R., Franz, S., & Tiziani, H. J. (1999). Optical roughness measurements with fringe projection. *Applied Optics*, 38(13), 2837-2842.

Apéndice A: PRODUCTOS

Parte de los resultados de este trabajo fueron presentados en el *XII CONGRESO EN ELECTRONICA Y TECNOLOGIAS AVANZADAS* que se realizó en la ciudad de Pamplona-Colombia del 10, 11 y 12 de mayo del 2017 en modalidad poster con el trabajo titulado: “Construcción e implementación de un microscopio perfilométrico por interferometría de luz blanca.

Figura 0-1: Certificado de ponencia XII CONGRESO INTERNACIONAL EN ELECTRONICA Y TECNOLOGIAS AVANZADAS.



Luego se presentaron otros resultados relevantes en el *XIII CONGRESO EN ELECTRONICA Y TECNOLOGIAS AVANZADAS* que se realizó en la ciudad de Pamplona-Colombia del 12, 13 y 14 de septiembre del 2018 en modalidad poster con el trabajo titulado: "TOPOGRAPHIC MEASUREMENT OF MICROSURFACE BY WHITE LIGHT INTERFEROMETRY".

Figura 0-2: Certificado de ponencia XIII CONGRESO INTERNACIONAL EN ELECTRONICA Y TECNOLOGIAS AVANZADAS.



Gracias a los resultados obtenidos en este trabajo, se logró un nuevo producto tipo artículo que fue aceptado un artículo en la revista indexada de CIETA y que será próximo a publicarse.

CONSTRUCCIÓN DE UN MICROSCOPIO PERFILOMETRICO POR INTERFEROMETRÍA DE LUZ BLANCA

CONSTRUCTION OF A PERFILOMETRIC MICROSCOPE USING WHITE LIGHT INTERFEROMETRY

Fis. Juan A. Sanchez-Daza, Doc. Martha Lucía Molina-Prado, Doc. Néstor. A. Arias-Hernández

Universidad de Pamplona, Grupo de Investigación de Óptica Moderna. Ciudadela Universitaria, Pamplona, Norte de Santander, Colombia. Tel.: (+577) 568 5303.
E-mail: {juanalbert.21, arias.her.nestor, molinaprado}@gmail.com

Resumen: En este trabajo se presenta el diseño y construcción de un microscopio perfilométrico por interferometría de luz blanca, que permite el levantamiento topográfico de objetos con resolución nanométrica. Por medio de un escaneo axial del objeto, se adquiere un conjunto de imágenes con franjas interferométricas deformadas las cuales dan información de la rugosidad del objeto. El principio del sistema está basado en la localización del pico de coherencia en cada posición $I_m(i,j)$ del conjunto de m imágenes adquiridas, en donde la posición $z(m)$ del pico de coherencia cambia de acuerdo a la topografía del objeto. Se presenta una serie de reconstrucciones tridimensionales de varios objetos a resolución nanométrica, obtenidas de manera automática con la ayuda de una interface gráfica elaborada en *Matlab*, que permite el control de los dispositivos, procesado digital de las imágenes y el cálculo de la topografía del objeto.

Palabras claves: Interferometría de luz blanca, Mirau, Sistema interferómetro Vertical.

Abstract: The design and construction of a profilometric microscope by white light interferometry, which allows the topographic lifting of objects with nanoscale resolution is presented. By means of an axial scanning of the object, a set of images with a system of deformed interferometric fringes which give information of the roughness of the object are acquired. The principle of the system it is based on the location of the coherence peak in each position $I_m(i,j)$ of the set of m acquired images, where the position $z(m)$ of the coherence peak changes according to the topography of the object. A series of three-dimensional reconstructions of several objects at nanometric resolution, obtained automatically with the help of a graphical interface elaborated in *Matlab*, which allow digital image processing and control of the devices and the calculation of the topography of the object is presented.

1. INTRODUCCIÓN

La interferometría de luz blanca es una técnica muy conocida en el estudio de topografías de objetos del orden nanométrico. Davidson (1987) utilizó la técnica de interferometría de luz policromática para medir el perfil de microcomponentes en los circuitos integrados. Lee y Strand, (1990) demostraron que la

resolución lateral podría mejorarse con interferometría de luz policromática o luz blanca en comparación con la del microscopio convencional. En los últimos años se han publicado muchas más aplicaciones de la interferometría luz blanca (Deck y Groot, 1994; Sandoz, 1999). Este trabajo describe el diseño y construcción de un sistema microscópico con un objetivo interferométrico tipo Mirau de 10X,

que permite extraer la información tridimensional de la muestra observada, la cual, se obtiene a partir de las imágenes adquiridas. Para calcular el pico de coherencia se implementa varios algoritmos como son: el cálculo del mínimo del interferograma, el cálculo del máximo de la envolvente (Larkin, 1996; Takeda et al., 1982) y la localización del centro de interferograma mediante el análisis de la fase por transformada de Fourier (Sandoz 1996; Gasvik, 2002).

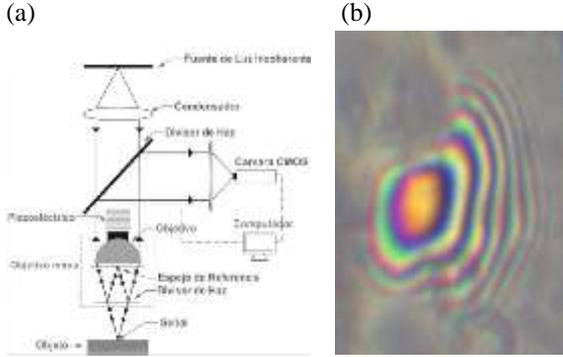


Fig. 1. (a) Esquema de sistema interferométrico tipo Mirau. (b) imagen interferométrica registrada por la cámara para cierta región de una esfera metalizada.

Una imagen interferométrica está compuesta por un sistema de franjas que contiene información de intensidad y de fase asociados a la muestra (objeto) (Fig. 1(b)). El objetivo interferométrico tipo Mirau, contiene en su interior un interferómetro que está compuesto por un divisor de haz entre el objetivo y la muestra (Fig. 1(a)), y un espejo de referencia sobre el centro de su cara frontal. El funcionamiento del objetivo interferométrico es similar al de un interferómetro tipo Michelson, con la diferencia que los dos brazos por donde la luz realiza su recorrido están en un mismo eje, por lo tanto, cuando el haz luminoso atraviesa el objetivo, el divisor de haz o lámina separatriz divide éste en dos: uno que se transmite hacia la muestra y el otro que es reflejado. El haz reflejado va al espejo de referencia, regresa a la lámina separatriz y se superpone con el reflejado por el objeto. Así, la correlación de los dos haces es vista por el sensor CMOS. El contacto óptico se obtiene cuando la diferencia de camino óptico entre el haz-espejo de referencia y el haz-objeto es cero. En este trabajo se detalla el microscopio construido, un esquema de funcionamiento del mismo, una descripción de los algoritmos de detección del pico de coherencia implementados, la interface de control de la cámara digital y el sistema de traslación piezoeléctrica. De igual manera se presenta una calibración de sistema en precisión, resolución y se da a conocer las ventajas del uso de esta técnica.

2. ANALISIS DE FRANJAS DE INTERFERENCIA DE LUZ POLICROMATICA

Al utilizar el sistema mostrado de la Figura 1(a)(b) con luz blanca o policromática, las reflexiones sobre la muestra, ubicada en el portaobjeto, son combinadas con las reflexiones provenientes del espejo de referencia, localizado en el objetivo Mirau. El campo eléctrico $E(t)$ que llega al detector es la superposición de la luz que proviene de la muestra y el espejo de referencia:

$$E(t) = E_s(t) + E_r(t + \tau) \quad (1)$$

Donde E_s y E_r son respectivamente las amplitudes ópticas del haz señal o de la muestra y del haz de referencia. Mientras que τ , es el tiempo de retraso debido a la diferencia de longitud en los caminos ópticos de los dos haces. La intensidad registrada por el detector está dada por,

$$I_d = \langle |E(t)|^2 \rangle = I_s + I_r + 2\sqrt{I_s I_r} \mathbb{R}\{ \gamma(\tau) \} \quad (2)$$

donde $\gamma(\tau)$ es la forma normalizada del grado complejo de coherencia mutua, que se expresa como,

$$g(t) = \frac{\langle E_s(t) E_r(t+t) \rangle}{\sqrt{I_s + I_r}} \quad (3)$$

En general, el grado complejo de coherencia mutua incluye los efectos de coherencia espacial y temporal. Para un interferómetro de amplitud como el interferómetro Mirau, la coherencia espacial se puede despreciar considerando un punto sobre la fuente incoherente espacialmente, así la coherencia mutua se reduce a la *auto-coherencia o coherencia temporal*, en este caso:

$$I_d(\tau) = \langle |E(\tau)|^2 \rangle = I_s + I_r + 2\sqrt{I_s I_r} \mathbb{R}\{ \gamma_{t,c}(\tau) \} \quad (4)$$

Donde, $\mathbb{R}\{ \gamma_{t,c}(\tau) \}$ es la parte real del grado complejo de coherencia temporal de la fuente de luz, la cual es la *forma normalizada de la función de auto-coherencia* $\gamma_{11}(\tau)$,

$$g_{11}(t) = \frac{G_{11}(t)}{G_{11}(0)}, \quad (5)$$

donde $\Gamma_{11} = \langle E(t + \tau) E^*(\tau) \rangle$ y el subíndice 11, corresponde a un único punto de la fuente incoherente. El grado complejo de coherencia normalizado de la fuente de luz es dado por la transformada de Fourier de la densidad espectral de energía de la fuente de luz. Si esta fuente de luz es policromática y tiene una densidad espectral de

energía gaussiana $G(f)$ con ancho espectral Δf y frecuencia media \bar{f} , el grado complejo de coherencia temporal γ_{11} estará dado por,

$$g_{11}(t) = G_0 \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left[-\left(\frac{f - \bar{f}}{\Delta f}\right)^2\right] \exp(-i2\pi f t) df \quad (6)$$

Donde G_0 es una constante. Teniendo en cuenta que $\gamma_{11}(0) = 1$, se tiene que:

$$\gamma_{11}(\tau) = \exp\left[-(\pi\tau\Delta f)^2\right] \exp(-i2\pi\bar{f}\tau) \quad (7)$$

Así la ecuación (4), se puede escribir como:

$$I_d(\tau) = I_s + I_r + 2\sqrt{I_s I_r} \exp\left[-(\pi\tau\Delta f)^2\right] \cos(2\pi\bar{f}\tau) \quad (8)$$

o

$$I_d = I_0 \left[1 + V(\tau) \cos(2\pi\bar{f}\tau)\right] \quad (9)$$

Donde I_0 es la intensidad de fondo ($I_s + I_r$), V es la función de contraste de las franjas o envolvente del patrón de franjas observado. Esta función V está dada por:

$$V(\tau) = \left(\frac{2\sqrt{I_s I_r}}{I_s + I_r}\right) \exp\left[-(\pi\tau\Delta f)^2\right] \quad (10)$$

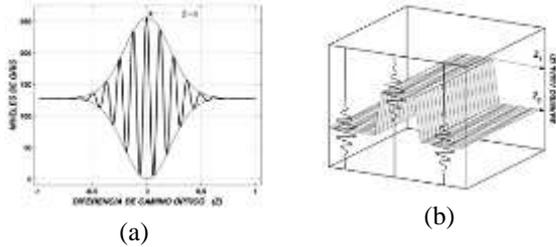


Fig. 2. (a) Perfil interferométrico de un pixel o interferograma. (b) Localización de los picos de coherencia de los interferogramas y determinación de las medidas de alturas para tres pixeles arbitrarios.

Si en el sistema de la Figura 2(a) y (b) el origen de coordenadas es tomado sobre un punto z en particular en la dirección axial, donde los dos caminos ópticos son iguales (contacto óptico) y la superficie de prueba es movida a lo largo del eje Z en una serie de pasos de tamaño ΔZ , entonces la intensidad sobre un punto (x, y) en el plano de la imagen que corresponde a un punto del objeto de altura h , se puede escribir como:

$$I_d(\tau) = I_s + I_r + 2\sqrt{I_s I_r} \gamma\left(\frac{p}{c}\right) \cos\left[\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)p + \phi_0\right] \quad (11)$$

donde I_s e I_r son las intensidades de los dos haces que actúan independientemente, $\gamma\left(\frac{p}{c}\right)$ es el grado

complejo de coherencia, la cual corresponde a la visibilidad de la envolvente de la franjas de interferencia, y $\cos\left[\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)p + \phi_0\right]$ es la modulación

cosenoidal donde $\frac{\bar{\lambda}}{2}$ corresponde a la longitud de onda media de la fuente, $p = 2(z - h)$ es la

diferencia de las longitudes de los caminos ópticos atravesados por los haces y ϕ_0 es la diferencia del corrimiento de fase debido a las reflexiones sobre el divisor de haz, los espejos y posiblemente el material de prueba. La Figura 2(b), muestra las variaciones de intensidad sobre el punto de la imagen cuando el objeto es barrido axialmente.

Se utiliza una cámara CMOS ubicada en el plano imagen del sistema óptico del microscopio como mecanismo de registro del interferograma, cada pixel de esta tiene la posibilidad de registrar patrones de interferencia similares a los de la Figura 2(a) en la medida que el objeto es desplazado en el eje axial Z , pero estos pueden tener la posición pico de coherencia en posiciones de barrido diferentes, esta diferencia de posiciones nos permite medir la forma del objeto (Fig. 2(b)).

3. METODOS DE DETECCION DEL PICO DE COHERENCIA

La interferometría con luz blanca es una técnica ampliamente utilizada para medidas topográficas de alta resolución axial sin contacto (Deck y Groot, 1994; Larkin, 1996; Sandoz, 1996). La técnica básicamente divide un rayo de luz de una fuente de luz blanca en dos haces separados. Un rayo es reflejado por la superficie del objeto a medirse (Brazo muestra) mientras que el otro sigue un trayecto conocido de distancia óptica constante (Brazo de referencia). Debido al ancho de banda espectral de la fuente, la longitud de coherencia es corta, y franjas de buen contraste se obtendrán únicamente cuando la diferencia de camino de los dos brazos del interferómetro sea menor a la longitud de coherencia de la fuente. Se utiliza un transductor piezoeléctrico (PZT), para variar la distancia óptica del brazo muestra del interferómetro y las variaciones de altura a través de la muestra pueden ser determinadas buscando la posición que tiene el PZT cuando se obtiene el máximo contraste de franjas. Este modo de operación es conocido como Modo de sensado del pico de coherencia por barrido vertical.

3.1 Detección de máximos o mínimo del interferograma.

La detección del máximo o mínimo es una técnica que aprovecha la propiedad de los interferogramas producidos por una fuente policromática. Según la Ecuación (9), las franjas se encuentran moduladas por una envolvente $V(\tau)$ presentando un máximo o mínimo de intensidad en puntos donde la diferencia de camino óptico es cero. Determinar la forma del objeto consiste en localizar la posición del máximo o mínimo del interferograma para cada punto del objeto, desplazando uno de los brazos del interferómetro Mirau, de tal manera, que cada punto pasará por el plano de contacto óptico en un valor de desplazamiento del portaobjeto, dependiendo de la diferencia de altura que tenga los diferentes puntos del objeto. La cámara CMOS registrará los valores de la intensidad del interferograma de tal forma, que permite almacenar el desplazamiento del portaobjeto asociado al valor de intensidad máximo o mínimo. Así se construye una matriz con las posiciones de desplazamiento del portaobjeto que brinda información de altura del objeto discretizada en un número de niveles de gris propio de la cámara utilizada. El criterio para escoger si es el máximo o el mínimo del interferograma con el que se trabajara, dependerá si las franjas de interferencia presentan un desfase con respecto al máximo de la envolvente. Se procura escoger aquella cuya franja coincida o esté más cercana al máximo o mínimo de la envolvente. En este trabajo, debido a los materiales utilizados se escogió el valor mínimo del interferograma $\min\{I_m(i,j)\}$.

3.2 Máximo de la envolvente del interferograma

El método de para detectar el pico de coherencia usando la envolvente del interferograma utiliza la Transformada de Fourier (Gasvik, 2002). El método de la transformada de Fourier fue concebido por Takeda (1982), quien empleó el método de la transformada rápida de Fourier (FFT). Al interferograma registrado para un pixel $g(z)$ se le aplica la Transformada de Fourier obteniendo su espectro.

$$G(f_z) = \mathfrak{T}\{g(z)\} = \int_{-\infty}^{\infty} g(z)e^{-2\pi if_z z} dz \quad (12)$$

En el espacio de frecuencias se ubica el primer armónico que contiene la información de frecuencias presente en el interferograma y se filtra con una ventana tipo hanning de la forma:

$$Hann(f_z) = \frac{1}{8} \left[1 - \cos \left(2\pi \left(\frac{f_z - f_0}{b_f} \right) \right) \right] \quad (13)$$

De manera que,

$$G_f(f_z) = G(f_z) \bullet Hann(f_z) \quad (14)$$

Donde f_0 es la frecuencia portadora.

Posteriormente se aplica la transformada inversa,

$$g_f(z) = \mathfrak{T}^{-1}\{G_f(f_z)\} = \int_{f_z} G_f(f_z) e^{2\pi if_z z} df_z \quad (15)$$

Finalmente se obtiene el módulo o envolvente del interferograma.

$$|g_f(z)| = \sqrt{\left(\text{Re}[g_f(z)] \right)^2 + \left(\text{Im}[g_f(z)] \right)^2} \quad (16)$$

Donde, $\text{Re}[g_f(z)]$ y $\text{Im}[g_f(z)]$ son la parte real e imaginaria de la transformada inversa respectivamente. Finalmente se calcula el máximo de dicha envolvente asociándolo al punto donde la diferencia de camino óptico es cero. Los pasos que describen este procedimiento se pueden ver en la Tabla 1 en los pasos 1, 2, 3 y 4.

3.3 Localización por valores de fase

Este método (Gasvik, 2002; Arias, 2009) sigue beneficiándose de las propiedades de la Transformada de Fourier, específicamente de la sensibilidad de la fase o también conocida como la propiedad de corrimiento,

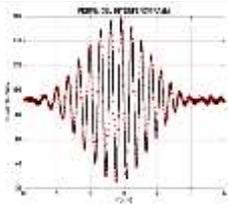
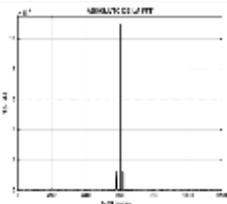
$$\mathfrak{T}\{g_f(z-a)\} = G_f(f_z) e^{-2\pi i(f_z a)} \quad (17)$$

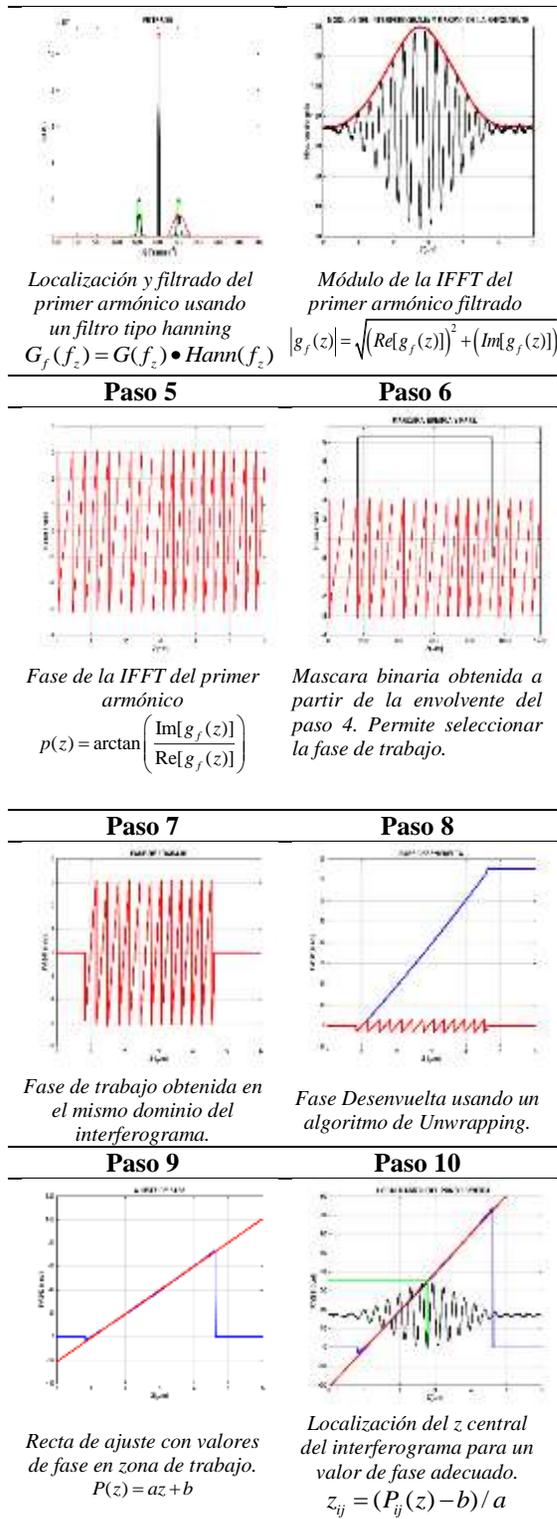
Una vez recuperada la transformada de Fourier inversa, se calcula $|g_f(z)|$ y la fase $p(z)$ del interferograma,

$$p(z) = \arctan \left(\frac{\text{Im}[g_f(z)]}{\text{Re}[g_f(z)]} \right) \quad (18)$$

Con la ayuda del módulo de la Ec.16 se crea una máscara binaria para filtrar la zona de la fase asociada al interferograma o fase de trabajo. Para localizar el pico de coherencia se desenvuelve la fase con un algoritmo de *unwrapping* cuyo punto inicial de desenvolvimiento y el máximo de la envolvente coinciden.

Tabla 1: Descripción del procedimiento

| Paso 1 | Paso 2 |
|--|--|
|  |  |
| Perfil del interferograma representado por: $g(z)$ | Transformada de Fourier del interferograma dada por: $G(f_z) = \mathfrak{T}\{g(z)\} = \int_{-\infty}^{\infty} g(z)e^{-2\pi if_z z} dz$ |
| Paso 3 | Paso 4 |



Se fija un valor de fase asociado al punto inicial $P(z)$ de desenvolvimiento para busca el valor de z usando una función de ajuste por mínimos cuadrados sobre la fase desenvuelta. Los pasos que

describen este procedimiento se pueden ver en la tabla 1, del paso 1 al 10.

$$P(z) = az + b \quad (19)$$

4. DESCRIPCION DEL MONTAJE.

En este trabajo se construye un software para controlar el dispositivo experimental que consta de una cámara digital tipo CMOS de 752x480 pixeles y un objetivo interferométrico tipo Mirau 10x un sistema de traslación piezoeléctrico con resolución de 1 nm y rango de trabajo de 100 μ m y un sistema de iluminación tipo LED blanca (Fig. 3(a)). El software construido permite controlar el proceso de captura de la cámara, así como la región de interés, sincronizado con el barrido axial del piezoeléctrico. Se obtiene un numero de imágenes determinado por el paso del piezoeléctrico y la profundidad del objeto de interés (Fig. 4(a)).



Fig. 3. (a) Montaje elaborado para la construcción del microscopio interferómetro. (b) Registro del interferograma (valor de nivel de Gris) en dos puntos del objeto a diferentes caminos ópticos, mientras el piezo realiza un barrido de 10 micrómetros, la localización de los máximos del interferograma permite establecer la diferencia de altura Δz de los puntos seleccionados.

En este trabajo se diseñó, construyó y se realizó la puesta a punto del microscopio interferómetro, el control de los dispositivos (cámara, piezo) desde el computador (Fig. 3(a)), así mismo, la implementación de los algoritmos de detección de pico de correlación (detección del mínimo del interferograma, detección del máximo de la envolvente (Takeda, 1982; Larkin, 1996) y por detección del centro de las franjas del interferograma mediante análisis de fase por Transformada de Fourier (Patrick Sandoz, 1996) (Fig. 4 y 5).

La interfaz permite obtener el perfil topográfico de un objeto, utilizando las tres técnicas de localización del pico de coherencia, en la Figura 5 se muestra los interferogramas en una sección vertical, para la reconstrucción de un espejo plano. Este resultado se obtuvo mediante el barrido vertical, con ayuda de un sistema de desplazamiento piezoeléctrico (PTZ) con paso de 5nm en un rango de 6 micras.

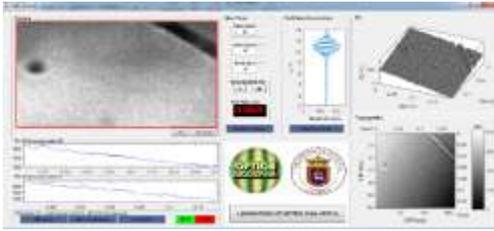


Fig. 4. Interface de control que permite la captura de los datos del interferograma y el cálculo de la topografía del objeto.

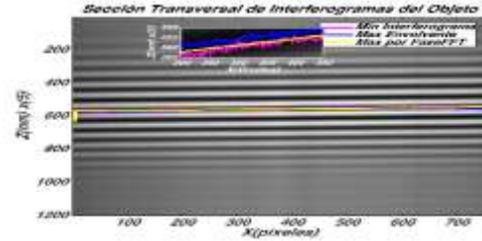


Fig. 5. Sección transversal de los interferogramas del objeto (espejo plano), en el cual se muestra los resultados del perfil del objeto por los tres métodos implementados (localización del mínimo de intensidad del interferograma, el máximo de la envolvente, y la localización del centro del interferograma por análisis de la fase por transformada de Fourier).

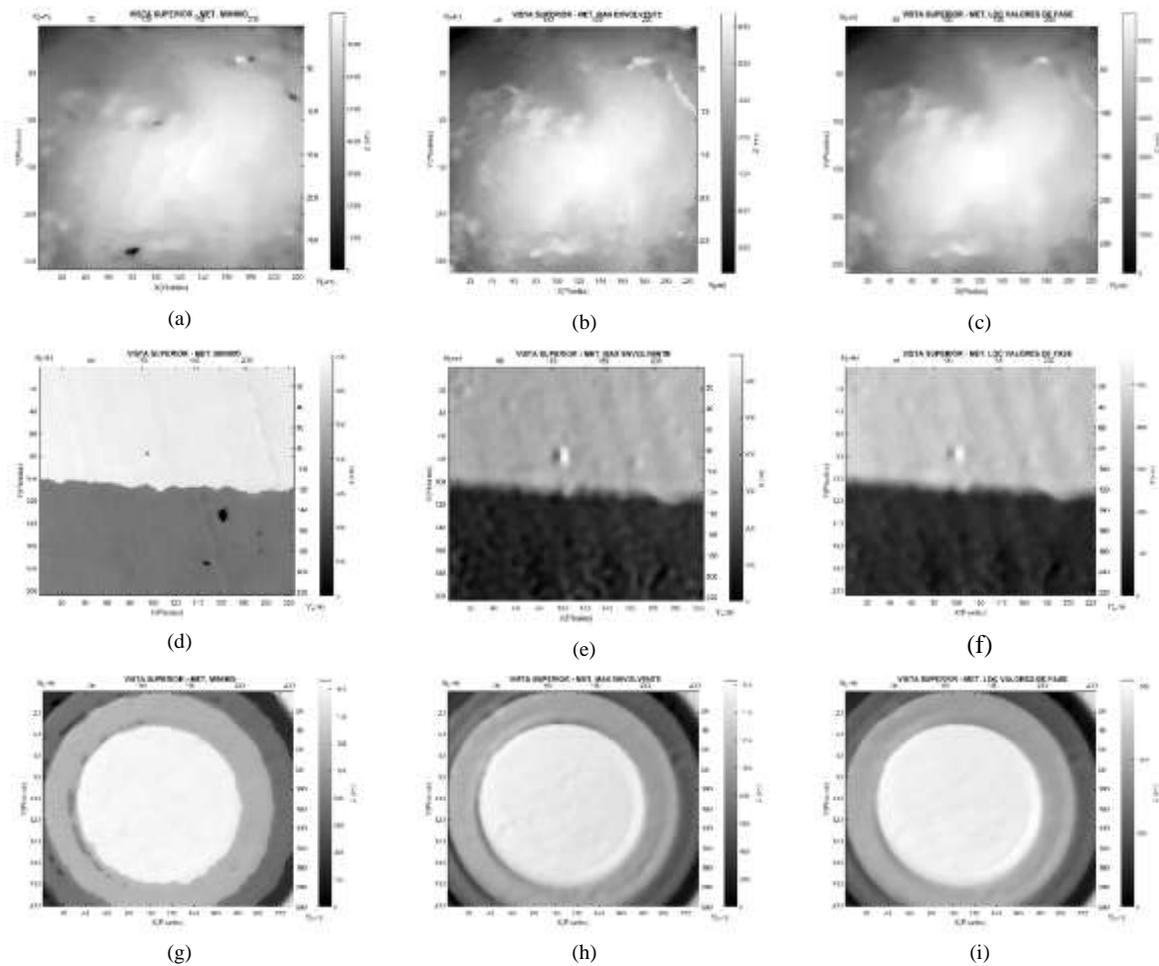


Fig. 6. Se presentan las vistas superiores obtenidas por los tres métodos: (a),(d),(g) Detección de Mínimos, (b),(e),(h) Máximo de la envolvente del interferograma y (c),(f),(i) Localización por valores de Fase.

Mientras se realiza el barrido axial se almacena la matriz con los valores de intensidad y el paso del piezoeléctrico. Aplicando los algoritmos de Detección de Mínimos (MM), Máximo de la envolvente (ME) y Localización por valores de fase (MF) sobre distintas muestras, se obtiene

información de su superficie. La Figura 6 (a), (b) y (c) muestra una vista superior de las reconstrucciones por los tres métodos de parte de una esfera metalizada, La Figura 6 (d), (e) y (f) muestra una vista superior de las reconstrucciones por los tres métodos de parte de una nanoestructura

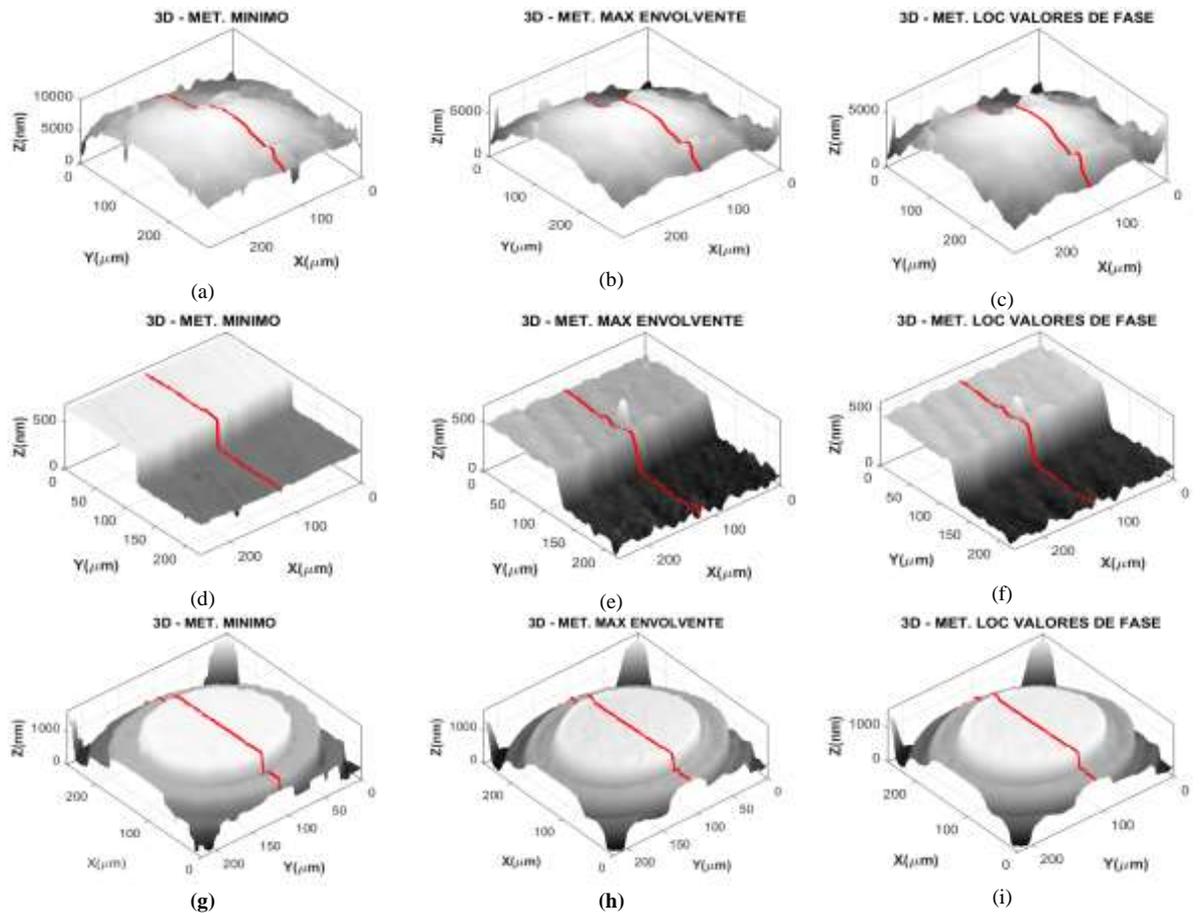


Fig. 7. Se presentan las vistas 3D obtenidas por los tres métodos: (a),(d),(g) Detección de Mínimos, (b),(e),(h) Máximo de la envolvente del interferograma y (c),(f),(i) Localización por valores de Fase.

con forma de escalón y La figura 6 (g), (h) y (i) muestra una vista superior de las reconstrucciones por los tres métodos de parte de cierta región de una microlente de Fresnel. De igual forma, las Figura 7 (a), (b) y (c) muestra la vista 3D de las reconstrucciones por los tres métodos de parte de una esfera metalizada, La Figura / (d), (e) y (f) muestra la vista 3D de las reconstrucciones por los

tres métodos de parte de una nanoestructura con forma de escalón y La Figura 7 (g), (h) y (i) muestra la vista 3D de las reconstrucciones por los tres métodos de parte de cierta región de una microlente de Fresnel. El rango de barrido axial depende de la altura de los detalles y la inclinación de la muestra, en los casos estudiados el rango fue de 4 micras a 20 micras.

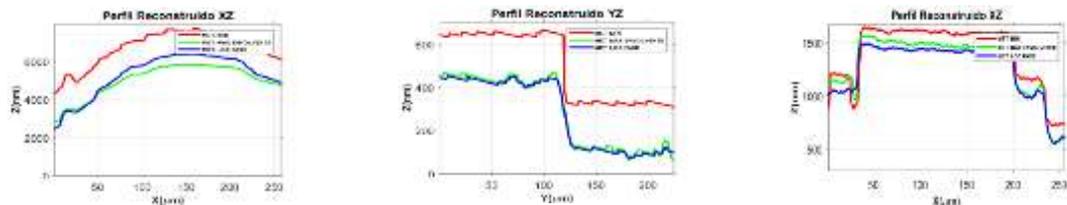


Fig. 7. Perfiles obtenidos para la reconstrucción de cada objeto: (a) esfera metalizada, (b) nanoestructura con forma de escalón y (c) micro lente de Fresnel.

Se calculó el error para los tres métodos al reconstruir un espejo asumiéndolo perfectamente plano. El plano que representa el espejo se obtiene mediante un ajuste por mínimos cuadrados. Al calcular la desviación estándar de éste con la topografía obtenida en cada caso, permite establecer cuál de los tres métodos es la de menor error. La reconstrucción topográfica de mejor comportamiento, es la del método de Localización por valor de fase, con una desviación estándar de 9.5 nm, seguida del método localización del método de localización del máximo de la envolvente con 14.4 nm y el de más bajo desempeño fue mínimo del interferograma con una desviación estándar con 23.8 nm de desviación estándar. Esto teniendo en cuenta que la matriz de interferogramas captadas por la cámara se registró a pasos del piezoeléctrico de 20nm. En la figura 7. (a), (b) y (c) se muestran los perfiles para la esfera metalizada, el escalón respectivamente y la lente de Fresnel, obtenidos por cada método evaluado en este trabajo. Esto permite observar el comportamiento diferencial de los métodos y destacando la superioridad en calidad del método de localización de valor de fase sobre los demás.

5. CONCLUSIONES

Se implementó un sistema de microscopía interferencial tipo Mirau, que permite obtener la topografía de objetos con alturas del orden de los nanómetros. Este microscopio es constituido por: un piezoeléctrico con una resolución axial de 0.1nm que permite obtener medidas de las alturas, una cámara CMOS de 480x752 pixeles y un objetivo interferométrico de microscopio de 10x, cuya zona de observación máxima es de 0.4x0.8mm. Se implementó tres métodos de detección del pico de coherencia, para el cálculo de la topografía de objetos cuyas alturas son del orden de los nanómetros: de Localización por valor de fase, localización del máximo de la envolvente y búsqueda del mínimo del interferograma $\min\{I_m(i,j)\}$. La resolución final del sistema construido, depende del paso seleccionado y del método utilizado, de tal forma que el método de reconstrucción topográfica de resolución nanométrica de mejor comportamiento, fue el de Localización por valor de fase, con una desviación estándar de 9.5nm con un paso de barrido de 20nm.

REFERENCIAS

Davidson, M., Kaufman, K., Mazor, I., & Cohen, F. (1987). An application of interference

microscopy to integrated circuit inspection and metrology. "Paper presented at the Integrated Circuit Metrology, Inspection, & Process Control"

- P. Sandoz, R. Escalona, V. Bonnans, and S. Dembele (1999), "From interferometry to image processing: Phase measurement vision method for high accuracy position sensing of rigid targets, Proceedings of Interferometry in Speckle Light: Theory and Applications". 421-428.
- P. J. Caber (1993), "Interferometric profiler for rough surfaces". *Appl. Opt.*, 19(32):3438-344.
- L. Deck and P. de Groot (1994), "High-speed noncontact profiler based on scanning white-light interferometry". *Appl. Opt.*, 31(33):7334-7338.
- P. de Groot and L. Deck (1995), "Surface profiling by analysis of white-light interferograms in the spatial frequency domain". *J. of Mod. Opt.*, 2(42):389-401.
- M. Takeda (1982), "Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry". *J. Opt. Soc. Am.*, (72):156-160.
- K. G. Larkin (1996), "Efficient nonlinear algorithm for envelope detection in white light interferometry". *J. Opt. Soc. Am.*, 13:832-843,
- P. Sandoz (1996), "An algorithm for profilometry by white light phase shifting interferometry". *J. Mod.Opt.* (43):1545-1554.
- Kjell J. Gasvik (2002) "Optical metrology", Third Edition. Spectral vision AS, Trondheim, Norway.
- N. Arias, M. A. Suarez, J. Meneses, Tijani Gharbi, (2009), "Medida de la Orientación, Posición y desplazamiento en el Plano de un objeto por codificación de Fase", *Revista BISTUA*, 2(7):70-76.
- Lee, B. S., & Strand, T. C. (1990). "Profilometry with a coherence scanning microscope". *Applied Optics*, 29(26), 3784-3788.



El Editor de la **Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada**:

HACE CONSTAR

Que Juan Alberto Sánchez Daza, Martha Lucía Molina Prado, Néstor Alonso Arias Hernández presentaron el artículo titulado: "TOPOGRAPHIC MEASUREMENT OF MICROSURFACE BY WHITE LIGHT INTERFEROMETRY".

Que el mencionado artículo se encuentra aceptado, está en la fase de revisión - corrección y será publicado en la revista. Adicionalmente que la Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada está categorizada en C en Publindex, entidad del Departamento Administrativo de Ciencias, Tecnologías e Innovación Colciencias encargada de Indexación y Homologación de publicaciones científicas en Colombia.

Dado en Pamplona, 27 de julio del 2018.



PhD. ALDO PARDO GARCÍA
Editor
Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada.