

U

P

T

**“Propuesta de reconfiguración para  
el interferómetro panorámico de  
patrones de moteado”**

Por

**Liline Daniel Canales Hernández.**

Tesis sometida como requisito parcial para  
obtener el grado de

**MAESTRO EN COMPUTACIÓN ÓPTICA**  
en la  
**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE  
TULANCINGO**

Agosto 2020  
Tulancingo de Bravo, Hidalgo.

Supervisada por:  
**Dr. Alfonso Padilla Vivanco**  
**Dr. Juan B. Hurtado Ramos**

©UPT

El autor otorga a la UPT el permiso de reproducir y  
distribuir copias en su totalidad o en partes de esta tesis.



# Contenido

Agradecimientos.....	vi
Reconocimientos.....	vii
Resumen.....	viii
Prefacio.....	ix
<b>Capítulo I. Antecedentes generales.....</b>	<b>1</b>
1.1 Estado del arte.....	1
1.2 Planteamiento del problema y justificación.....	3
1.3 Objetivos generales y específicos.....	4
<b>Capítulo II. Marco teórico.....</b>	<b>5</b>
2.1 Interferometría.....	5
2.1.1 Holografía.....	6
2.2 Fenómeno de Interferencia.....	7
2.3 Localización de las franjas.....	9
2.4 Coherencia.....	10
2.5 Interferómetros.....	11
2.5.1 Interferómetro de dos haces.....	11
2.5.2 El interferómetro de Michelson.....	12
2.5.3 El interferómetro de Mach-Zehnder (MZI).....	13
2.6 Mediciones de longitud.....	15
2.6.1 Interferometría Heterodina.....	15
2.6.2 Interferómetro de dos longitudes de onda.....	17
2.6.3 Interferometría por modulación de frecuencia.....	17
2.7 La interferometría usada para pruebas ópticas en diferentes superficies.....	18
2.7.1 Superficies planas.....	18
2.7.2 Homogeneidad.....	18
2.7.3 Superficies cóncavas y convexas.....	19
2.7.4 Prismas.....	19
2.7.5 Superficies Asféricas.....	20
2.7.6 Superficies ópticamente rugosas.....	21
2.8 Análisis de franjas.....	21

2.8.1 Rastreo de franjas y análisis de Fourier. ....	21
2.8.2 Interferometría por desplazamiento de fase (PSI). ....	21
2.9 Microscopia de interferencia. ....	23
2.9.1 Interferómetro de Mirau. ....	23
2.9.2 El interferómetro de Normanski. ....	24
2.9.3 Interferometría por Láser-Doppler. ....	25
2.10 El fenómeno de moteado (speckle). ....	26
2.10.1 Campos de moteado (Speckle). ....	27
2.11 Método de sustracción para la obtención de los interferogramas. ....	32
<b>Capítulo III. Desarrollo experimental. ....</b>	<b>35</b>
3.1 Desarrollo del esquema experimental. ....	36
3.2 Elementos ópticos básicos del arreglo experimental. ....	36
3.3 Elementos electrónicos básicos del arreglo experimental. ....	39
3.4 Descripción de la nueva técnica ESPI panorámica. ....	40
3.5 Arreglo experimental de la técnica panorámica ESPI de partida. ....	42
3.6 Arreglo experimental alternativo de la nueva técnica panorámica ESPI. ....	49
3.7 Propuesta número uno de reconfiguración para la nueva técnica panorámica ESPI. ....	55
3.7 Propuesta número 2 de reconfiguración para la nueva técnica panorámica ESPI. ....	58
<b>Capítulo VI. Conclusiones. ....</b>	<b>63</b>
<b>Trabajos a futuro. ....</b>	<b>66</b>
<b>Referencias. ....</b>	<b>67</b>

## Índice de figuras.

Figura 1 Evaluación de errores por interferencia en una superficie de prueba plana pulida [11].	9
Figura 2 Interferómetro de Michelson	12
Figura 3 Interferómetro de Twyman- Green.	13
Figura 4 Interferómetro de Mach-Zehnder.	13
Figura 5 Interferencia constructiva (a); interferencia destructiva (b).	14
Figura 6 Interferómetro para conteo de franjas usando un láser de dos frecuencias (Dukes, J.N, Gordon, G. B. (1970), Hewlett-Packard J. 21, 2-8. Hewlett-Packard Company.	16
Figura 7 Interferómetro de Fizeau utilizado para probar superficies planas cóncavas y convexas.	19
Figura 8 Interferómetro de Twyman-Green usado para probar prismas.	20
Figura 9 Interferómetro de Mirau [10]	24
Figura 10 Perforaciones o pits ( 90 nm de profundidad aproximada) en la superficie de un CD-ROM. Campo de visión 11 $\mu\text{m}$ x 13 $\mu\text{m}$ (Veeco Instruments Inc.) [10]	24
Figura 11 Interferómetro de Laser- Doppler utilizado para hacer mediciones de velocidades de flujo [9].	25
Figura 12 Campo de moteado.	27
Figura 13 Espejos parabólicos usados en el arreglo propuesto.	37
Figura 14 Esquema que muestra los ejes coordenados relacionados con el movimiento del objeto.	41
Figura 15 El arreglo muestra cómo están colocados los componentes ópticos, así como los opto-electrónicos	43
Figura 16 Arreglo armado en UPT por Liline Daniel Canales Hernández.	44
Figura 17 Imagen del arreglo óptico armado en el laboratorio de óptica de la UPT.	44
Figura 18 Interferograma obtenido con el arreglo de la figura 16 y gráficos de la medición de intensidad horizontal y vertical en la zona mostrada.	46
Figura 19 Patrones de interferencia de moteado correspondientes a un desplazamiento en el eje z (axial a la cámara). Desplazamiento de 0.1, 0.2, 0.3 y 0.4 $\mu\text{m}$ respectivamente.	47
Figura 20 Patrones de interferencia de moteado correspondientes a un desplazamiento en el eje x. Desplazamientos de 0.1 y 0.2 $\mu\text{m}$ respectivamente.	47
Figura 21 Patrones de interferencia de moteado correspondientes a un desplazamiento en el eje x. Desplazamientos de 0.3 y 0.4 $\mu\text{m}$ respectivamente.	48

Figura 22 Patrones de interferencia de moteado correspondientes a un desplazamiento en el eje $y$ . Desplazamientos de 0.1, 0.2, 0.3 y 0.4 $\mu\text{m}$ respectivamente.....	48
Figura 23 Arreglo experimental desarrollado en el laboratorio de la Universidad Politécnica de Tulancingo por L. Daniel Canales Hernández .....	50
<i>Figura 24</i> Imagen del espejo Ep2 recibiendo el haz del espejo Ep1 que se refleja en el cilindro. La primera con luz encendida y la segunda con luces apagadas.....	51
Figura 25 Interferograma proporcionado por el arreglo de la figura 23.....	51
Figura 26 Patrones de interferencia obtenidos a partir del arreglo de la figura 23. Desplazamientos en el eje $z$ de 0.1 y 0.2 $\mu\text{m}$ respectivamente.....	52
Figura 27 Patrones de interferencia obtenidos a partir del arreglo de la figura 23. Desplazamientos en el eje $z$ de 0.3 y 0.4 $\mu\text{m}$ respectivamente.....	52
Figura 28 Patrones de interferencia obtenidos a partir del arreglo de la figura 23. Desplazamientos en el eje $x$ de 0.1 y 0.2 $\mu\text{m}$ respectivamente.....	53
Figura 29 Patrones de interferencia obtenidos a partir del arreglo de la figura 23. Desplazamientos en el eje $x$ de 0.3 y 0.4 $\mu\text{m}$ respectivamente.....	54
Figura 30 Patrones de interferencia obtenidos a partir del arreglo de la figura 23. Desplazamientos en el eje $y$ de 0.1 y 0.2 $\mu\text{m}$ respectivamente.....	54
Figura 31 Patrones de interferencia obtenidos a partir del arreglo de la figura 23. Desplazamientos en el eje $y$ de 0.3 y 0.4 $\mu\text{m}$ respectivamente.....	55
Figura 32 Arreglo óptico propuesto por el Dr. Juan B. Hurtado Ramos y armado en la UPT. Reconfiguración número 1.....	56
Figura 33 Interferograma de referencia para la configuración número 1.....	57
Figura 34 Patrones de interferencia obtenidos a partir del arreglo de la figura 32. Desplazamientos en el eje $z$ de 0.1 y 0.2 $\mu\text{m}$ respectivamente.....	57
Figura 35 Patrones de interferencia obtenidos a partir del arreglo de la figura 32. Desplazamientos en el eje $z$ de 0.3 y 0.4 $\mu\text{m}$ respectivamente.....	58
Figura 36 Arreglo óptico 2a configuración. Diseñado por Liline Daniel Canales Hernández en la UPT. ....	59
Figura 37 Imagen del interferograma de referencia para la configuración número dos del arreglo óptico de la figura 36.....	59
Figura 38 Patrones de interferencia obtenidos a partir del arreglo de la figura 36. Desplazamientos en el eje $z$ de 0.1 y 0.2 $\mu\text{m}$ respectivamente.....	60

Figura 39 Patrones de interferencia obtenidos a partir del arreglo de la figura 64. Desplazamientos en el eje z de 0.3 y 0.4 $\mu\text{m}$ respectivamente .....	60
Figura 40 Patrones de interferencia obtenidos a partir del arreglo de la figura 36. Desplazamientos en el eje x de 0.1 y 0.2 $\mu\text{m}$ respectivamente .....	61
Figura 41 Patrones de interferencia obtenidos a partir del arreglo de la figura 36. Desplazamientos en el eje x de 0.3 y 0.4 $\mu\text{m}$ respectivamente .....	61
Figura 42 Patrones de interferencia obtenidos a partir del arreglo de la figura 36. Desplazamientos en el eje y de 0.1 y 0.2 $\mu\text{m}$ respectivamente .....	62
Figura 43 Patrones de interferencia obtenidos a partir del arreglo de la figura 36. Desplazamientos en el eje y de 0.3 y 0.4 $\mu\text{m}$ respectivamente .....	62

## Agradecimientos.

- A ti Isa, mi amor, mi vida, mi esposa y compañera, por ser el centro de mi vida. Por estar ahí en todos y cada uno de mis pasos. Gracias por tus consejos, tu paciencia y detalles...  
¡¡¡¡Te amo mi cariñito!!!!
- A ti Luigui, por permitirme ser tu papá y tu amigo al mismo tiempo... Gracias por todo lo que me enseñas día con día... Como lo aprendiste de Mamá, eres la parte observadora, honesta y crítica de mi vida... ¡¡¡¡¡Te adoro mi niño!!!!!!!!!!...
- A mis hermanos por todo su apoyo y estímulo para seguir adelante. ¡Los adoro!!!
- A ti Mamá, por enseñarme que el trabajo y la constancia rinden frutos. ¡Te amo mucho!!!
- A ti viejo lindo, que, aunque ya no estás en materia, si estás en mis pensamientos diarios. Sé perfectamente que desde donde te encuentras estarás contento por este nuevo logro... ¡¡¡¡Y voy por más!!!!... Gracias por creer en mí hasta el final... ¡¡Te adoro Papá, Eres lo máximo!!!!
- A mi familia... Son esa parte de mi mundo en el que puedo ser yo... Gracias Gaby, Teté, Ferchis, Andy, Mau y Emi, por darme la alegría de ser tío... Gracias cuñadas por hacerme reír cuando el cansancio me alcanzó.

Este proyecto es el fruto de muchas horas de estudio y trabajo en el laboratorio, mismo esfuerzo que no habría sido posible sin la ayuda de estas y muchas otras personas que no he logrado nombrar.

Simple y sencillamente

¡¡¡¡¡¡¡GRACIAS!!!!!!!!!!

## **Reconocimientos.**

- A mis directores de tesis por su estímulo, acompañamiento, ayuda, apertura y apoyo incondicional en la elaboración de este trabajo de tesis. También por sus fructíferas pláticas y discusiones.
- A mis sinodales, por hacerme el honor de revisar y evaluar este trabajo.
- A mis catedráticos por la formación académica de excelencia.
- A mis compañeros de clase y laboratorios, por la ayuda y apoyo recibido, sin el cual habría sido imposible terminar este proyecto.
- Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, CONACYT, por la beca otorgada.
- A la Universidad Politécnica de Tulancingo por su gran calidad educativa.
- Al Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada CICATA IPN Querétaro y a sus estudiantes por todo su apoyo, colaboración y amistad.

## **Resumen.**

Este trabajo de tesis se enfoca a desarrollar nuevas técnicas de Interferometría electrónica de patrones de moteado, ESPI (acrónimo en inglés de Electronic Pattern Speckle Interferometry) para poder realizar mediciones de desplazamiento en la superficie interior de un objeto cilíndrico. La técnica ESPI de la que se parte, se describe en Soto et al [1], dicho interferómetro, se compone de dos espejos paraboloídes. Nuestro proyecto contempla el uso de un solo espejo paraboloíde, con el fin de reducir el tamaño del interferómetro. Para tal efecto, se proponen dos arreglos ópticos en los cuales se obtuvieron resultados favorables. La diferencia radica en que en uno de ellos se obtienen interferogramas de mejor calidad. Cabe mencionar que tanto las dos propuestas como el arreglo de referencia [1], son instrumentos de muy alta sensibilidad. Y, aunque es posible su aplicación en la industria, su uso suele encontrarse mayormente en laboratorios de metrología de calibración de parámetros físicos primarios y secundarios.

## **Prefacio.**

Esta tesis consta de cuatro capítulos.

En el capítulo 1 se habla de los antecedentes generales para la elaboración de este trabajo. Esto es, tanto el estado del arte, como los objetivos generales y específicos que conforman el mismo.

El capítulo 2, nos lleva al marco teórico de esta tesis. Los fundamentos en los que se basa este proyecto. Nos da una descripción de conceptos clave para el entendimiento de esta investigación como son: el concepto de interferometría óptica y su importancia en el desarrollo de la metrología a partir de los avances tecnológicos. También nos ayuda a comprender el fenómeno de interferencia. Así mismo, abordamos algunos de los principales interferómetros en la actualidad.

El capítulo 3 se muestra el desarrollo experimental de este trabajo de tesis. En él se vierten los conocimientos adquiridos durante la etapa de experimentación.

Por último, en el capítulo 4, se describen las conclusiones y resultados obtenidos en esta investigación, así como los trabajos a futuro que se presentaron como oportunidades para mejorar este trabajo.

## Capítulo I. Antecedentes generales.

---

### 1.1 Estado del arte.

A continuación, se muestra el estado del arte correspondiente a esta tesis.

1. En Jean-François Vandenrijt et al [2], se muestra el desarrollo de un instrumento móvil cuyo funcionamiento se basa en las técnicas ESPI y que utiliza un láser de  $CO_2$  y una cámara térmica infrarroja. Este dispositivo se puede transportar a los sitios de medición y ha sido usado en ambientes industriales con grados importantes de perturbación. De los últimos usos que se le ha dado a este dispositivo está el analizar la estructura compuesta de grandes aeronaves en una inspección normal dentro de un hangar.

2. En Guangkai Sun et al [3], se muestra un estudio de detección sin contacto en planchas aeronáuticas con materiales compuestos mediante ondas ultrasónicas generadas por láser. Los resultados se obtienen tanto de cálculos teóricos como de mediciones experimentales y muestran un buen acuerdo. Se logró ver que los defectos internos de los compuestos pueden caracterizarse efectivamente por la variación en la amplitud de las señales de onda transmitidas. Los resultados de este estudio demuestran lo efectiva que resulta la técnica de ultrasonido láser para la detección de defectos internos tanto en plásticos reforzados por fibra de carbón como en matrices de cerámica compuesta por fibras continuas reforzadas, las cuales son muy utilizadas en la industria de la aviación.

3. En Jean-François Vandenrijt et al [4], se demuestra que la metrología holográfica digital con LWIR (long-wave infrared) se ha convertido en una tecnología de madurez comprobada que se puede aplicar fuera de los laboratorios. Es capaz de hacer frente a cierto número de

aplicaciones exigentes como medir grandes desplazamientos de objetos complejos sometidos a grandes temperaturas y variaciones en entornos de trabajo difíciles.

4. Igor Alexeenko [5], nos dice que la interferometría holográfica en el rango LWIR, se puede usar para la medición de superficies mecánicas extendidas. El algoritmo desarrollado puede registrar y representar los resultados en tiempo real. También muestra que la transformada de Fourier no es el método más adecuado para este arreglo en particular, debido a la baja resolución espacial de los detectores infrarrojos. La desventaja de la interferometría holográfica por LWIR se encuentra en los altos costos de los detectores, en contraposición de los bajos costos de láseres de  $CO_2$ . La ventaja de esta técnica, radica en el hecho de que se pueden medir deformaciones de gran tamaño comparadas con otros métodos que usan luz visible, más aún, el uso de LWIR permite hacer mediciones en ambientes con condiciones perturbadoras. Aunque el estudio reporta que los primeros experimentos fueron realizados en condiciones de laboratorio.

5. Venancio Martínez García [6], muestran la comparativa entre dos técnicas de análisis de estrés residual para el taladrado, la primera, utilizando calibradores de tensión, y la segunda, utilizando interferometría holográfica digital. Este último, les permite establecer una técnica para llevar a cabo mediciones durante el proceso de maquinado, lo cual les proporciona información en tiempo real de propiedades inherentes a la pieza, como el estrés térmico al que se le somete.

6. Pedro J. Sousa et al [7], se presenta una metodología para la medición de desplazamientos sub-micrométricos en diseños de PCB (printed circuit board) utilizando la interferometría de patrón de moteado electrónico 3D. Mediante esta técnica es posible obtener mediciones reales y se logra hacer comparaciones entre dos técnicas: la

correlación de imagen digital microscópica (DIC) y la interferometría de patrón de moteado electrónico (ESPI).

7. Araceli Soto et al [1], se presenta un arreglo óptico para un interferómetro panorámico de moteado utilizando dos espejos parabólicos. Lo cual permite obtener patrones de moteado de buen contraste en dos ejes de desplazamiento.

8. Sara B. Fair et al [8], desarrollan un método para obtener las ecuaciones paramétricas necesarias para cuantificar las modulaciones en el vector de sensibilidad cuando se aplica la ecuación de desplazamiento de fase en mediciones interferométricas. El sistema utiliza dos lentes anulares panorámicas. Por medio de estas, se obtiene la imagen del interior del objeto de estudio.

## **1.2 Planteamiento del problema y justificación.**

La industria tradicional utiliza métodos de medición para la deformación y desplazamiento en 3D por “contacto” o “punto a punto”. Estos no son particularmente eficientes. Los procedimientos para realizar las mediciones son tediosos, costosos y complejos. La industria moderna requiere métodos de medición rápidos y confiables para medir las deformaciones, posición, forma rugosidad, estrés, etc. La metrología por moteado (speckle), es una metodología óptica que evita el contacto con el objeto a analizar, y puede proporcionar medidas de la deformación y desplazamiento, forma del objeto, rugosidad de la superficie, vibración, eventos dinámicos en superficies rugosas y, todo esto, con sensibilidades del orden de una longitud de onda de la luz. En particular, las técnicas ESPI combinadas con computadores avanzados, y un potente procesamiento digital de imágenes hacen de estas técnicas una herramienta invaluable para el campo de la metrología.

### **1.3 Objetivos generales y específicos.**

Objetivo general:

Desarrollar nuevas técnicas ESPI para la medición de partes internas de formas cilíndricas, con el fin de facilitar la medición de desplazamientos en el rango de micras. Haciendo uso de las herramientas necesarias para el desarrollo de un prototipo para la medición de micro-deformaciones y micro-desplazamientos en cuerpos cilíndricos.

Objetivos específicos:

1. Realizar la validación de la adquisición de patrones de interferencia debido a desplazamientos que se obtuvieron con el arreglo de base [1] para el interferómetro panorámico de moteado.
2. Obtener interferogramas sensibles a desplazamientos del sistema de visión al menos en dos ejes.
3. Reconfigurar el interferómetro para trabajar con solo un espejo paraboloide.
4. Demostrar la factibilidad de utilizar el principio de visión panorámico con espejos convexos en el desarrollo de una nueva técnica ESPI.

## Capítulo II. Marco teórico.

---

### 2.1 Interferometría.

La interferometría óptica utiliza el fenómeno de interferencia entre las ondas de luz para realizar mediciones extremadamente precisas. El patrón de interferencia contiene, además de información sobre los caminos ópticos atravesados por las ondas, información sobre el contenido espectral de la luz y su distribución espacial sobre la fuente. Young fue el primero en afirmar el principio de interferencia y demostrar que la suma de dos rayos de luz podía generar oscuridad, pero el padre de la interferometría óptica fue sin duda Michelson. Las contribuciones de Michelson a la interferometría, desde 1880 hasta 1930, dominaron el campo hasta tal punto que la interferometría óptica fue considerada durante muchos años como un capítulo cerrado. Sin embargo, las últimas cuatro décadas han visto un crecimiento explosivo de interés en la interferometría debido a varios desarrollos nuevos [9].

El láser es el más importante de ellos, ya que puso a la mano, por vez primera, una fuente de luz cuya coherencia, tanto espacial como temporal, e intensidad es notablemente alta. Otro desarrollo que ha revolucionado la interferometría ha sido la aplicación de técnicas electrónicas. El uso de conjuntos de detectores fotoeléctricos y computadoras digitales ha hecho posibles mediciones directas de la diferencia del camino óptico en un conjunto de puntos que cubren un patrón de interferencia, con muy alta precisión, en muy poco tiempo. En una partícula en movimiento, la luz que la misma dispersa tiene su frecuencia desplazada, la que corresponde de manera proporcional a la componente de su velocidad

en una determinada dirección, la misma que está ligada a las direcciones de iluminación y visualización.

Los láseres han permitido medir este cambio de frecuencia y, por lo tanto, la velocidad de las partículas, al detectar los pulsos producidos al mezclar los rayos dispersos y el rayo láser original. Otro avance importante ha sido el uso de fibras ópticas mono-modo para construir interferómetros de dos haces análogos a los convencionales. La fibra óptica nos permite acomodar trayectorias ópticas largas en espacios pequeños, haciendo con esto que los interferómetros de fibra óptica se puedan usar como sensores de rotación. Aunado a esto, y dado que la longitud de camino óptico cambia con la presión y la temperatura, también se ha encontrado que dichos interferómetros se pueden usar como sensores de dichas cantidades físicas. En el campo de la interferometría estelar, ahora es posible combinar imágenes de conjuntos de grandes telescopios espaciados ampliamente para obtener una resolución extremadamente alta. La interferometría también se aplica a la detección de ondas gravitacionales de agujeros negros y supernovas [9].

### **2.1.1 Holografía.**

La holografía es un método de imagen completamente nuevo basado en interferencia óptica. La interferometría holográfica ha permitido mapear los desplazamientos de una superficie rugosa con una precisión de unos pocos nanómetros, e incluso hacer comparaciones interferométricas de dos frentes de onda almacenados que existieron en diferentes momentos. La interferometría holográfica y una técnica relacionada, la interferometría moteada (speckle), ahora se utilizan ampliamente en la industria para

pruebas no destructivas y de análisis estructural. Las aplicaciones descritas anteriormente proporcionan una visión de las muchas áreas de la óptica que usan interferometría.

## 2.2 Fenómeno de Interferencia.

Cuando se superponen dos ondas de luz, la intensidad resultante de dicha sumatoria depende de si dichas ondas se refuerzan o cancelan entre sí. Este es el conocido fenómeno de la interferencia. Si, en cualquier punto, las amplitudes complejas de dos ondas de luz, derivadas de la misma fuente puntual monocromática y polarizadas en el mismo plano, son

$$A_1 = a_1 \exp(-i \phi_1)$$

Y

$$A_2 = a_2 \exp(-i \phi_2)$$

La irradiancia (en  $Wm^{-2}$ ) en este punto,

$$I = |A_1 + A_2|^2 ,$$

$$I = I_1 + I_2 + 2(I_1 I_2)^{1/2} \cos(\phi_1 - \phi_2), \quad (2.1)$$

Donde  $I_1$  y  $I_2$  son las intensidades de las dos ondas incidentes y  $\phi_1 - \phi_2$  es la diferencia entre sus respectivas fases [10].

La visibilidad  $V$  de las franjas de interferencia está dada por la siguiente relación:

$$V = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}}$$

$$V = \frac{2(I_1 I_2)^{1/2}}{I_1 + I_2}. \quad (2.2)$$

Los efectos de la interferencia se hacen evidentes al observar una placa transparente iluminada por una fuente puntual monocromática. En este caso, la interferencia se da entre las ondas reflectadas sobre las superficies frontales y traseras de la placa.

Para un haz que incide en un ángulo  $\theta_1$  en una placa plano paralela (de espesor  $d$ , e índice de refracción  $n$ ) y refractado dentro de la placa en un ángulo  $\theta_2$ , la diferencia de camino óptico entre los dos haces es

$$\Delta_p = 2n d \cos \theta_2 + \frac{\lambda}{2}, \quad (2.3)$$

Ya que se introduce una diferencia de fase de  $\pi$  por la reflexión de una de las superficies. Las franjas de interferencia son círculos centrados en la normal de la placa (franjas de igual inclinación o franjas de Haidinger) [10].

Con un haz colimado, las franjas de interferencia serán contornos de espesor óptico idéntico (franjas de Fizeau). Las variaciones en la diferencia de fase observada pueden representar la variación en el espesor o el índice de refracción de la placa. Se puede comparar una superficie pulida plana con otra superficie plana que sirva de referencia, esto es, haciendo contacto una con otra y observando las franjas que se forman en la película de aire que se forma entre ellas. Si introducimos una leve variación en la alineación entre las superficies,

tanto de estudio como de referencia, podremos observar cómo se forman franjas casi rectas y paralelas. Cualquier desviación de planicidad en la superficie en estudio con respecto a la superficie de referencia, se observará como una deformación en el patrón de franjas. Estos resultados se pueden evaluar midiendo la desviación máxima ( $\Delta x$ ) de una franja con respecto a otra de referencia (que sea recta), así como también se debe medir la distancia de separación entre franjas sucesivas ( $x$ ). Cada franja corresponde a un cambio en la OPD (Optical Path Difference, diferencia de camino óptico) de  $\frac{1}{2}$  de longitud de onda como se muestra en la figura 1.



Figura 1 Evaluación de errores por interferencia en una superficie de prueba plana pulida [11].

### 2.3 Localización de las franjas.

Una fuente monocromática extendida puede considerarse como un arreglo independiente de fuentes puntuales. Ya que las ondas de luz toman diferentes caminos hacia el punto en donde se forma la interferencia, la interferencia elemental producida por dos de estas ondas, por lo general, no coincide. Por lo tanto, el contraste máximo de las franjas de interferencia será observado solo en una región en particular (la región de localización).

Con una paca plano-paralela, las franjas de interferencia se localizarán en el infinito. Con una película delgada en cuña, y con una incidencia cerca de la normal, las franjas se localizarán en la cuña [9].

## 2.4 Coherencia.

Un estudio detallado [11] muestra que los efectos de la interferencia tienen una dependencia con el grado de correlación existente entre los campos de onda en el punto de observación. La intensidad del patrón de interferencia está dada por la siguiente relación

$$I = I_1 + I_2 + 2(I_1 I_2)^{1/2} |\gamma| \cos(\arg \gamma + 2\pi\nu\tau) \quad (2.4)$$

Donde  $I_1$  y  $I_2$  son las intensidades de los dos haces,  $\nu$  es la frecuencia de la radiación,  $\tau$  es la media de tiempo de retraso entre la llegada de los dos haces y  $\gamma$  es el grado de coherencia (complejo) entre los campos de las ondas.

Con dos haces de igual intensidad, la visibilidad de las franjas de interferencia es igual a  $|\gamma|$ , con un valor máximo de 1 cuando la correlación entre los campos de las ondas se complete.

La correlación entre los campos de dos puntos cualesquiera, cuando la diferencia entre el camino óptico y la fuente es lo suficientemente pequeño como para despreciar los efectos debidos al ancho de banda espectral, es una medida de la coherencia espacial de la luz. Si el tamaño de la fuente y la separación de los dos puntos es muy pequeña comparada con la distancia a la fuente, se puede mostrar que el ángulo complejo de coherencia está dado

por la transformada bidimensional normalizada de Fourier de la distribución de intensidad sobre la fuente. Así mismo, la correlación entre los campos en un mismo punto en tiempos distintos, es una medida de la coherencia temporal de la luz y está relacionada con el ancho de banda espectral. Con una fuente puntual (o cuando la interferencia se da entre elementos correspondientes del frente de onda original) la visibilidad de las franjas como una función del retraso es la transformada de Fourier de la fuente del espectro.

Para completar este análisis, debemos tomar en cuenta los efectos de polarización. En general, para una visibilidad máxima, los haces deben comenzar en el mismo estado de polarización e interferir en el mismo estado de polarización también. Para luz natural (no polarizada), la diferencia de camino óptico deberá ser la misma para todas las polarizaciones.

## **2.5 Interferómetros.**

### **2.5.1 Interferómetro de dos haces.**

Se pueden utilizar dos métodos para obtener dos haces de una fuente común. En la división de frente de onda, dos haces son aislados de áreas separadas del frente de onda primario. Esta técnica fue usada en el experimento de Young y en el interferómetro de Rayleigh.

La forma más común para obtener dos haces a partir del mismo frente de onda primario (división de amplitud) es usando un divisor de haz, una rejilla de difracción o un prisma polarizado.

### 2.5.2 El interferómetro de Michelson.

En el interferómetro de Michelson (figura 2) se usa un divisor de haz, para dividir y recombinar los haces. En este caso específico, se ha utilizado un divisor de cubo, el cual no necesita compensarse como en el caso de utilizar divisores en placa que necesariamente deben tener el mismo grosor y ser del mismo material.

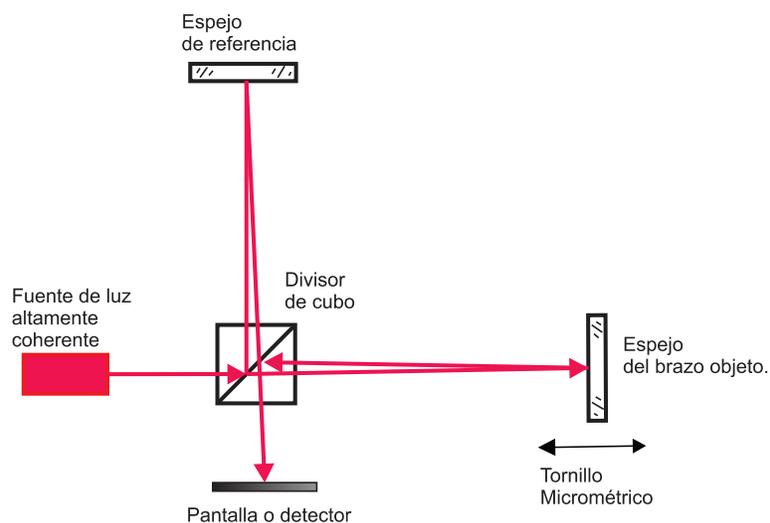


Figura 2 Interferómetro de Michelson

El patrón de interferencia observado es similar al producido en una placa ( $n = 1$ ) delimitada por un espejo, y la imagen, del otro espejo, producida por reflejo del divisor de haz. Con una fuente de luz extendida, las franjas de interferencia son círculos localizado en el infinito (franjas de igual inclinación). Con luz colimada, (el interferómetro de Twyman-Green, figura 3) se obtienen franjas rectas, paralelas y de igual grosor (franjas de Fizeau).

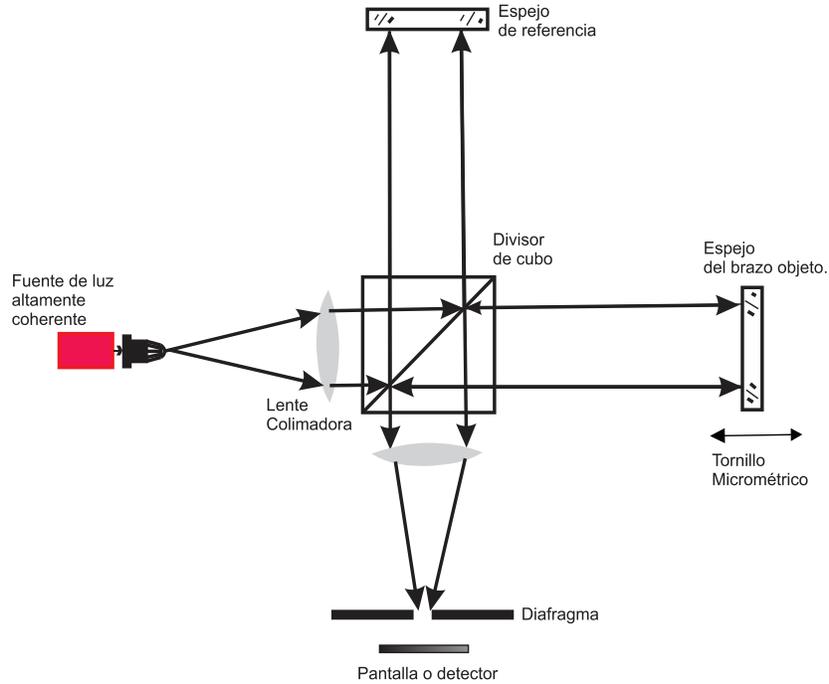


Figura 3 Interferómetro de Twyman- Green.

### 2.5.3 El interferómetro de Mach-Zehnder (MZI).

Este interferómetro cuenta con dos divisores de haz para dividir y recombinar los haces.

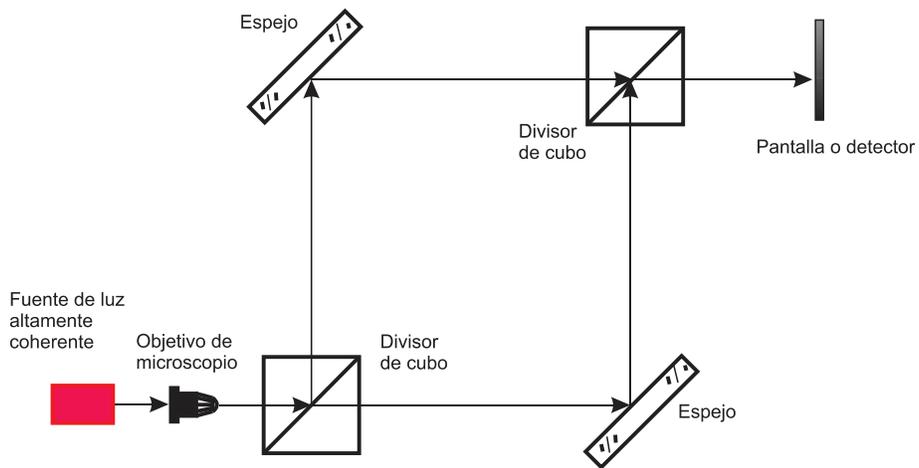


Figura 4 Interferómetro de Mach-Zehnder.

La figura 4 muestra un interferómetro Mach-Zehnder el cual muestra un claro ejemplo del funcionamiento en general. El haz de luz emitido por un láser se divide en dos caminos para posteriormente volver a unirse, obteniendo así una interferencia entre los dos caminos creados. El resultado de esta interferencia dependerá de la longitud de los dos caminos ópticos, produciéndose así, una suma destructiva o constructiva en función del valor de la diferencia entre los caminos, como se muestra en la figura 2.

Si se lee la interferencia mediante un fotodetector, y asumimos que uno de los caminos mantiene una longitud fija y conocida, las variaciones en el otro camino se verán directamente reflejadas en la tensión del fotodetector. El cambio de una situación de interferencia constructiva, suma en fase de las señales, a una interferencia destructiva, suma en contrafase, ocurre cuando la diferencia entre los caminos es igual a  $n \cdot \lambda/2$ , siendo  $n$  un número entero y  $\lambda$  la longitud de onda del haz de luz.

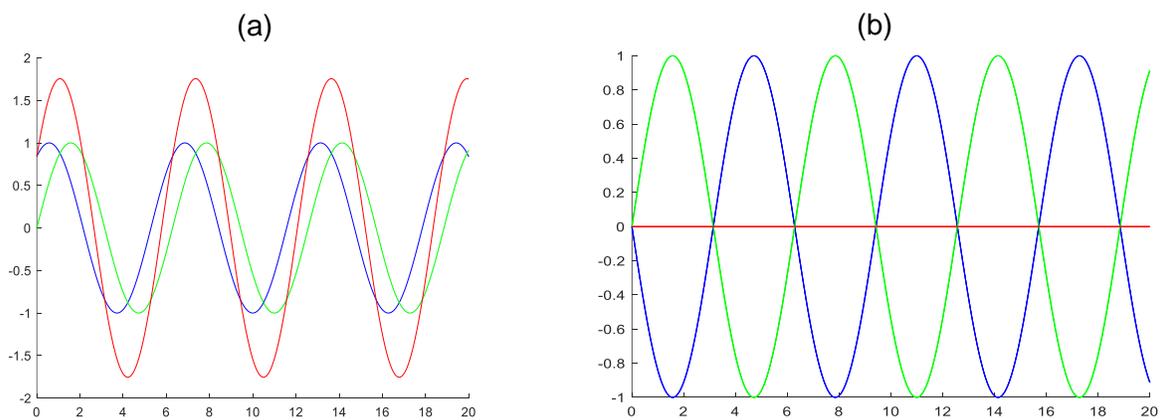


Figura 5 Interferencia constructiva (a); interferencia destructiva (b).

El MZI tiene la ventaja de que cada camino óptica es atravesado solo una vez. En suma, con una fuente de luz extendida, la región de localización de las franjas se puede hacer coincidir con la sección de prueba. El MZI se ha utilizado ampliamente para mapear variaciones locales del índice de refracción en túneles de viento, llamas y plasmas. Una

variante, el interferómetro Jamin, junto con el interferómetro Rayleigh, es comúnmente utilizado para medir el índice de refracción de gases y mezclas de gases. Para hacer mediciones interferométricas, es necesario realizar mediciones precisas del índice de refracción del aire, esto como prerrequisito.

## **2.6 Mediciones de longitud.**

El ancho de banda espectral extremadamente estrecho de la luz de un láser ha llevado al desarrollo de una serie de técnicas interferométricas para mediciones directas en grandes distancias. Los valores obtenidos para la longitud del camino óptico se dividen entre el valor del índice de refracción del aire, bajo las condiciones de medición, para obtener la verdadera longitud de camino óptico.

### **2.6.1 Interferometría Heterodina.**

En el interferómetro Hewlett–Packard, un láser de He-Ne es forzado a oscilar simultáneamente a dos frecuencias separadas cerca de 2 MHz aplicando un campo magnético longitudinal. Como se muestra en la figura 6, estas dos frecuencias que tienen polarizaciones circulares opuestas pasan a través de una placa de  $\lambda/4$  que las convierte a polarizaciones linealmente ortogonales.

Un divisor polarizado refleja una de las frecuencias a un cubo divisor, mientras que la otra es transmitida a otro cubo divisor. Ambas frecuencias retornan sobre un mismo eje y después de pasar por un polarizador de  $45^\circ$ , inciden en un foto detector. El ritmo de

frecuencias de este detector y la señal proveniente de un detector de referencia van a un contador diferencial. Si uno de los cubos divisores se mueve, la cuenta neta nos da el cambio en la OPD en longitudes de onda.

Con este detector se pueden medir cambios muy pequeños en las longitudes.

En una técnica [12], se introduce un pequeño desplazamiento de frecuencia entre los dos haces, típicamente por medio de un par de moduladores acústico-óptico operados a frecuencias un poco diferentes. La salida de un detector que puede ver el patrón de interferencia contiene un componente en la frecuencia de diferencia, y la fase de esta señal heterodina corresponde a la diferencia de fase entre los rayos interferentes.

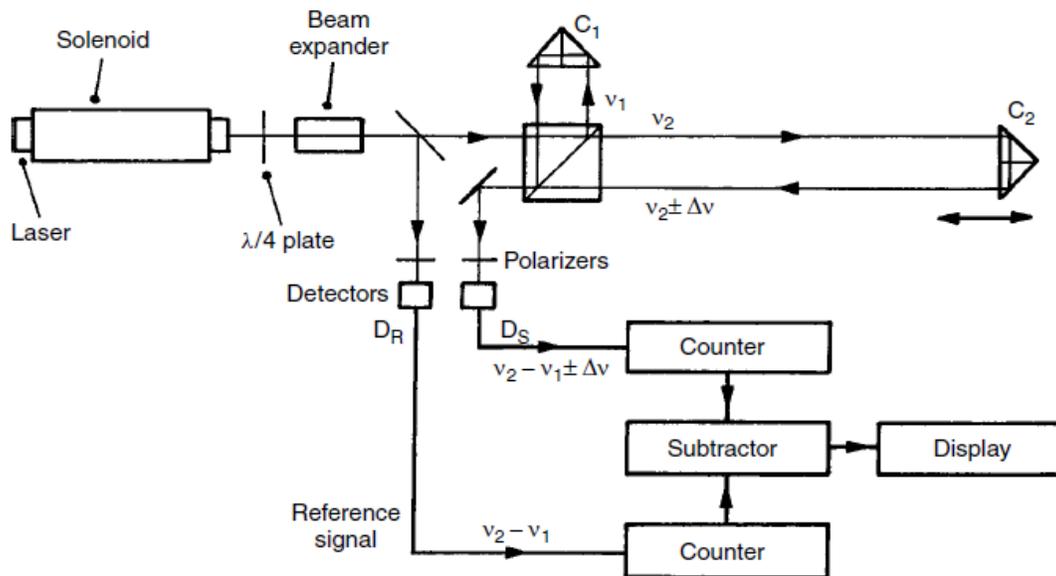


Figura 6 Interferómetro para conteo de franjas usando un láser de dos frecuencias (Dukes, J.N, Gordon, G. B. (1970), Hewlett-Packard J. 21, 2-8. Hewlett-Packard Company.

### 2.6.2 Interferómetro de dos longitudes de onda.

Si un interferómetro es iluminado simultáneamente por dos ondas con longitudes de onda distintas,  $\lambda_1$  y  $\lambda_2$  la envolvente de las franjas produce un patrón de interferencia que puede ser reproducido con una longitud de onda sintética  $\lambda_s$  (simulada), tal que:

$$\lambda_s = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{|\lambda_1 - \lambda_2|} \quad (2.8)$$

Una forma de implementar esta técnica es con un láser de CO<sub>2</sub>, el cual permite cambiar rápidamente entre dos longitudes de onda, así como uno de los espejos de un interferómetro se mueve para realizar las mediciones. La señal de salida del fotodetector se procesa para obtener la diferencia de fase en cualquier punto [13].

### 2.6.3 Interferometría por modulación de frecuencia.

Se pueden realizar mediciones absolutas de distancia con un láser semiconductor mediante un barrido lineal de frecuencias con respecto al tiempo [14]. Si la OPD (Optical Path Difference) entre dos haces en el interferómetro es  $L$ , uno de los haces llega al detector con un retraso  $L/c$ , e interfieren para producir una señal con frecuencia, tal que:

$$f = \left(\frac{L}{c}\right) \left(\frac{df}{dt}\right) \quad (2.9)$$

Donde  $df/dt$  es la tasa en la cual el láser varía en el tiempo.

## **2.7 La interferometría usada para pruebas ópticas en diferentes superficies.**

### **2.7.1 Superficies planas.**

El interferómetro de Fizeau es usado ampliamente para comparar superficies planas pulidas con estándares de superficies planas sin que las mismas estén en contacto y con el riesgo de dañar las superficies. Se han hecho mediciones en franjas de un mismo grosor formadas con luz colimada en el espacio que separa ambas superficies.

Para determinar la planicidad absoluta, es posible usar una superficie líquida como referencia; sin embargo, un método más comúnmente utilizado es el de trabajar con un set de tres pares de superficies nominalmente planas. De esta manera, los errores en las mediciones de estos tres sets se evaluarán sin la necesidad de un estándar de superficie plana.

### **2.7.2 Homogeneidad.**

La homogeneidad del material se puede revisar preparando una muestra plano-paralela y colocándola en el camino de prueba del interferómetro. Los efectos de las imperfecciones de la superficie y de los errores sistemáticos se pueden minimizar sumergiendo la muestra en una solución con índice de refracción similar al del aceite y realizar mediciones con y sin la muestra en dicho camino de prueba.

### 2.7.3 Superficies cóncavas y convexas.

Los interferómetros de Fizeau y Twyman-Green pueden utilizarse para probar superficies cóncavas y convexas, en la figura 7 se muestra un arreglo práctico para probar superficies curvas.

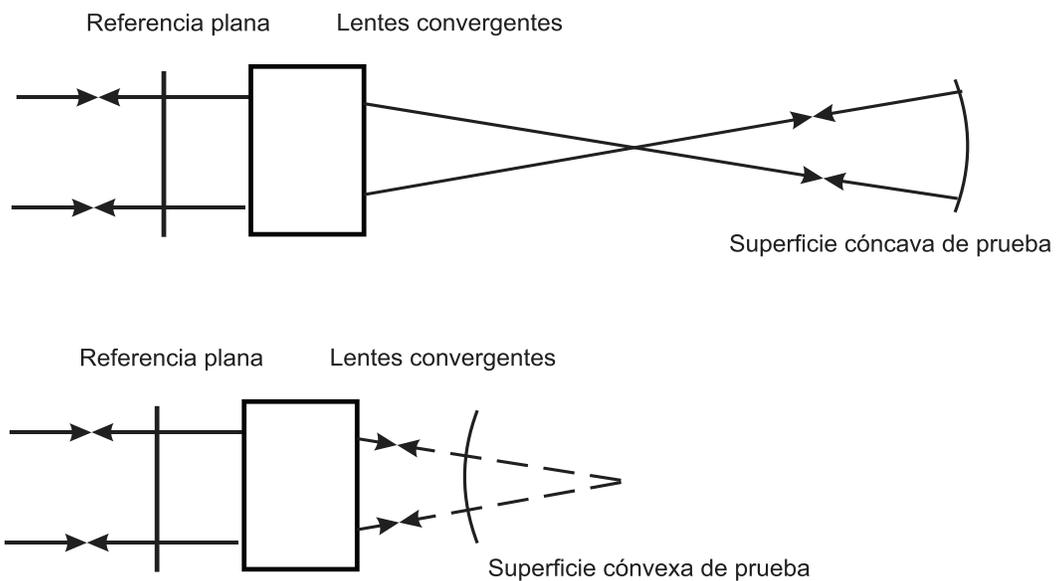


Figura 7 Interferómetro de Fizeau utilizado para probar superficies planas cóncavas y convexas.

### 2.7.4 Prismas.

En la figura 8 se muestra un interferómetro de Twyman- Green con un arreglo para probar un prisma de 60°.

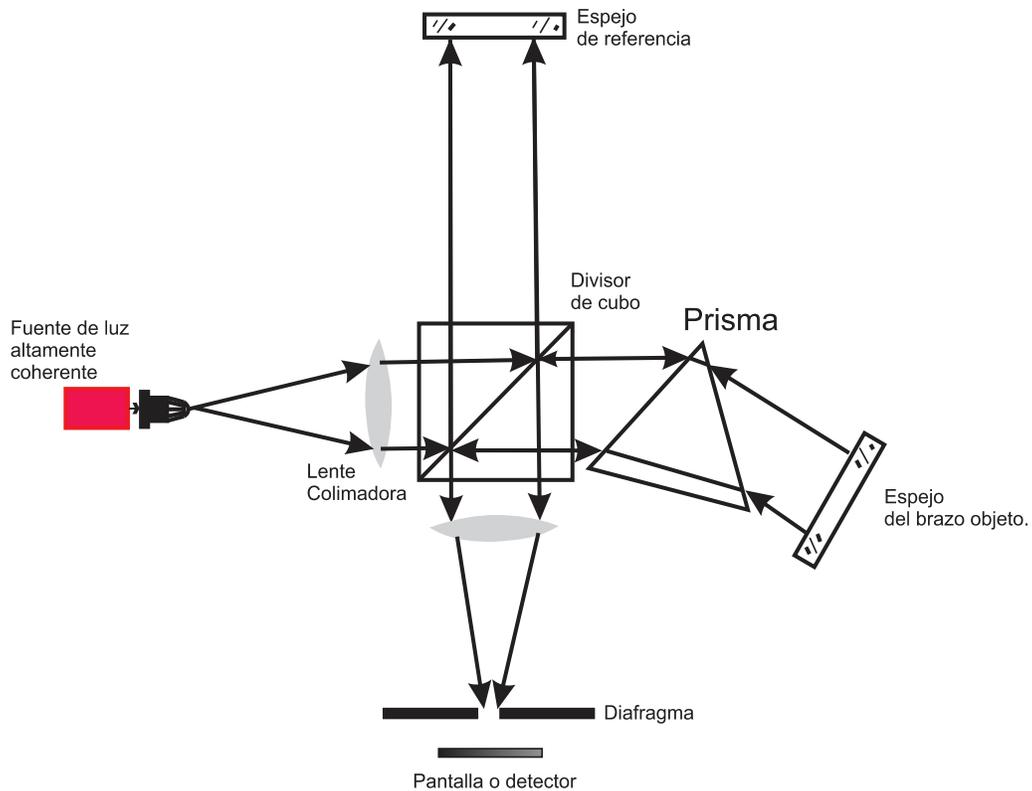


Figura 8 Interferómetro de Twyman-Green usado para probar prismas.

### 2.7.5 Superficies Asféricas.

Pueden surgir problemas al comparar superficies esféricas contra un frente de onda de referencia esférico porque las franjas en algunas partes del interferograma resultante puede estar demasiado cerca para resolverse. Una manera de resolver este problema es usar un lente compensador nulo [15]; otro es usar un holograma generado por computadora para producir un frente de onda de referencia que coincida con el frente de onda esférico deseado [16, 17]. La interferometría de cizallamiento es la otra forma de reducir la cantidad de franjas en el interferograma [18, 19].

### **2.7.6 Superficies ópticamente rugosas.**

Una forma de probar superficies antes de pulir, es mediante la interferometría infrarroja con un láser de CO<sub>2</sub> a una longitud de onda de 10.6  $\mu\text{m}$ . Una forma alternativa más simple, con superficies nominalmente planas, es usar incidencia oblicua [20].

## **2.8 Análisis de franjas.**

Se puede extraer información sumamente precisa de un patrón de interferencia, incluidos los cálculos de los coeficientes de aberración, esto, usando una cámara electrónica en interface con una computadora para medir y procesar la distribución de intensidad en el patrón de interferencia. Por otro lado, también se pueden obtener mediciones muy exactas de desplazamientos, deformaciones y modos de vibración.

### **2.8.1 Rastreo de franjas y análisis de Fourier.**

Una primera aproximación al análisis de franjas se basó en el rastreo de las mismas. En orden de analizar un patrón de franjas simple, se introduce una inclinación entre los frentes que interfieren, así se obtiene una cantidad nominalmente alta de franjas rectas. La forma de las franjas se verá modificada por los errores en el frente de onda de prueba. El análisis de Fourier de franjas puede determinar la desviación del frente de onda de prueba.

### **2.8.2 Interferometría por desplazamiento de fase (PSI).**

El hacer mediciones directas sobre la diferencia de fase entre dos haces en un arreglo de puntos espaciados uniformemente tiene grandes ventajas. En orden de determinar la fase del frente de onda en cada punto, se deben tomar, por lo menos, tres interferogramas. La diferencia de fase entre dos haces varía usualmente de forma lineal con respecto del tiempo, y la intensidad de la señal se integra en cada punto sobre un número igual de segmentos de fase que cubren un periodo de la señal sinusoidal de salida. Esta técnica se simplifica generalmente ajustando la diferencia de fase en pasos iguales.

La forma más común de lograr el desplazamiento de fase entre el objeto y el haz de referencia es cambiando la diferencia de camino óptico entre los haces mediante un desplazamiento del espejo de referencia a lo largo del eje óptico. Otras formas incluyen el mover el divisor, mover la rejilla, el desplazamiento de frecuencia o el rotar el analizador. Generalmente se suelen usar de tres a cinco interferogramas para calcular la diferencia de fase original entre los frentes de punto a punto. La repetitividad de las mediciones es cerca de  $\frac{\lambda}{1000}$ .

Debido a que el algoritmo para calcular la fase contiene una función arco tangente, la cual no lleva información del orden integral de interferencia, es necesario desenvolver la fase para detectar cambios en el orden integral de interferencia y remover discontinuidades en la recuperación de la fase.

Normalmente, para implementar dicho procedimiento de desenvolvimiento de fase, es necesario tener al menos dos mediciones por espaciamiento de franjas; esta condición, limita los gradientes de fase que pueden ser medidos. Sin embargo, existen técnicas que

se pueden usar en situaciones especiales, con algunos conocimientos a priori acerca de la prueba de superficies, esto con el fin de trabajar sin la condición mencionada.

## **2.9 Microscopia de interferencia.**

La microscopía de interferencia provee un método de no-contacto para el estudio de superficies, así como también un método para estudiar células vivas sin la necesidad de contaminarlas.

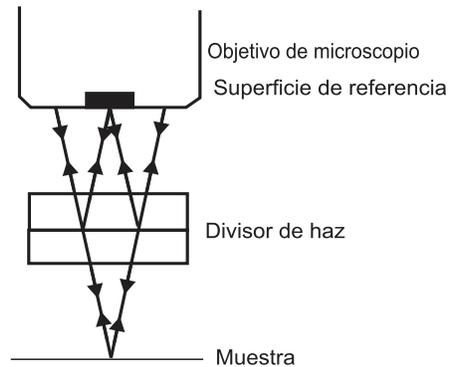
Una configuración aceptable es la que describe Linnik [21] en la cual un divisor de haz dirige la luz a dos objetivos idénticos; uno incide en la superficie de prueba, mientras que el otro se dirige al espejo de referencia.

### **2.9.1 Interferómetro de Mirau.**

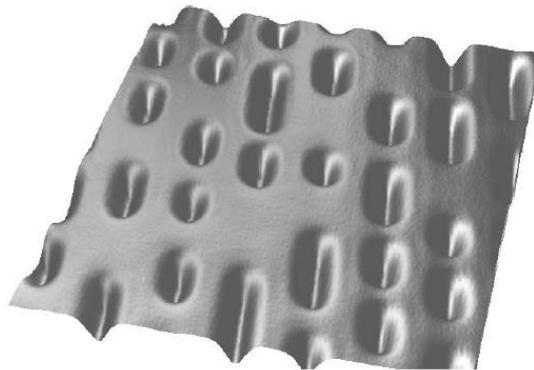
El interferómetro de Mirau permite un arreglo óptico compacto. Como se muestra en el esquema figura 9, la luz del iluminador se hace incidir del objetivo de microscopio al divisor de haz. El haz transmitido cae en la superficie de prueba, mientras que el reflejado cae sobre un punto aluminizado en una superficie de referencia. Los dos haces se recombinan en el mismo divisor de haz y regresan al objetivo.

Como se puede ver en la figura 10, se pueden conseguir mediciones muy precisas de perfiles en superficies, los datos se pueden procesar para obtener la rugosidad de las superficies y la función de auto-covarianza de la superficie. La auto-correlación normalizada y la correlación cruzada proporcionan el grado de coherencia de un campo

electromagnético. Nota del autor (la función que permite determinar qué tan coherente es la superficie)



*Figura 9 Interferómetro de Mirau [10]*



*Figura 10 Perforaciones o pits ( 90 nm de profundidad aproximada) en la superficie de un CD-ROM. Campo de visión 11  $\mu\text{m}$  x 13  $\mu\text{m}$  (Veeco Instruments Inc.)[10]*

### **2.9.2 El interferómetro de Normanski.**

Los microscopios de interferencia de camino común usan elementos polarizadores para dividir y recombinar los haces [22]. En el interferómetro de Normanski, dos prismas polarizadores introducen un corte lateral entre los dos haces.

Con pequeños objetos aislados, se observan dos imágenes cubiertas por franjas que mapean los cambios de fase introducidos por el objeto. Con objetos más grandes, el patrón de interferencia es una medida de los gradientes de la fase, revelando los contornos y los defectos locales.

### 2.9.3 Interferometría por Láser-Doppler.

Esta hace uso del hecho de que luz dispersada por una partícula en movimiento tiene su frecuencia desplazada.

En el arreglo de la figura 11 dos haces que se interceptan en ángulos  $\pm\theta$  con dirección del ángulo de observación, dichos haces son usados para iluminar el campo de prueba.

La frecuencia de la señal de pulso observada es

$$\Delta\nu = \frac{2v \sin \theta}{\lambda} \quad (2.11)$$

Donde  $v$  es la componente de la velocidad de la partícula en el plano de los haces a cierto ángulo en la dirección de observación.

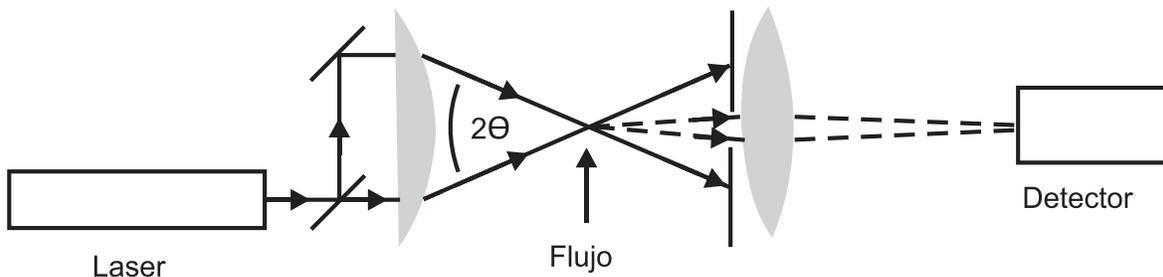


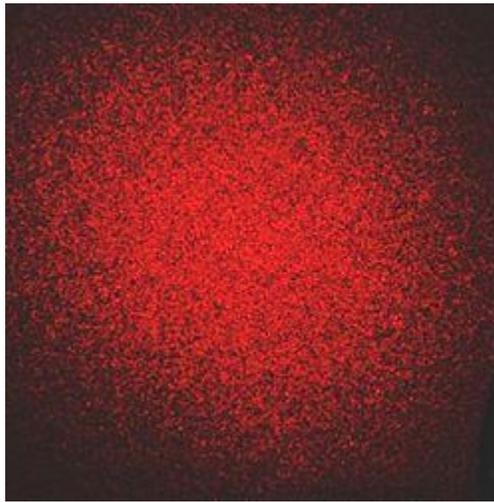
Figura 11 Interferómetro de Láser- Doppler utilizado para hacer mediciones de velocidades de flujo [9].

## **2.10 El fenómeno de moteado (speckle).**

Entre los años 60's y 70's se descubrió que el fenómeno era producido por la interacción entre las ondas difundidas aleatoriamente por los distintos puntos de las superficies rugosas; también, que el campo de puntos oscuros y brillantes puede ser fotografiado sin necesidad de formar una imagen del objeto del cual procede. Se han desarrollado modelos tomando en cuenta las diversas condiciones de iluminación, naturaleza y estado del difusor, logrando recuperar información del medio difusor y considerando diferentes geometrías de iluminación y observación. Se han desarrollado interferómetros de speckle sensibles a los desplazamientos de la superficie difusora en direcciones específicas [23]. Tiempo después, surge la idea de sustituir la película fotográfica por una cámara de televisión y procesar la señal de video resultante, a lo que se le llamó ESPI (Interferometría Electrónica de Patrones de Speckle) [23]. La interferometría electrónica de patrones de moteado, ESPI (acrónimo de Electronic Speckle Pattern Interferometry) nos sirve como herramienta para el estudio de las propiedades mecánicas de los metales y otros materiales. La utilización de la luz con alta coherencia espacial y temporal (propiedades de la luz láser) nos permite crear interferómetros que aprovechan el fenómeno de destrucción y amplificación de las ondas electromagnéticas cuando se sobreponen, esta superposición crea franjas oscuras y brillantes las cuales son utilizadas como un patrón de referencia en mediciones cuando se comparan con el medio que se quiere caracterizar [24]. Las técnicas ESPI (también llamadas Holografía TV) se han visto beneficiadas con el desarrollo en los últimos años de nuevas tecnologías, como las CCD, novedosos sistemas de procesamiento de imágenes y la transmisión de luz mediante fibras ópticas, por nombrar algunos.

### 2.10.1 Campos de moteado (Speckle).

Según Mathias Lehmann [25], el moteado o speckle, son puntos brillantes y oscuros distribuidos de forma aleatoria (figura 12).



*Figura 12 Campo de moteado.*

La intensidad del campo de moteado en un punto P en el espacio, está determinada por la suma coherente de todas sus amplitudes complejas aportadas por los diferentes puntos del objeto que dispersan la luz.

Así como varía aleatoriamente la altura de la superficie del objeto, también varían las fases de las contribuciones de la amplitud del campo en cada punto P.

Así pues, dependiendo de cómo se distribuyan las fases en dicho punto P, será que se tenga una amplitud alta o una baja.

La amplitud compleja  $\mathbf{A} = A^{(r)} + iA^{(i)}$  (recordar que  $\mathbf{A}$  es un vector) depende de ciertos factores:

- a) Asumir que todas las fases de las pequeñas aportaciones son uniformes, distribuidas sobre un intervalo completo  $2\pi$ .
- b) Que las amplitudes y fases son variables estadísticamente independientes y el número de aportaciones es suficientemente grande.

Si estas condiciones se cumplen, se puede demostrar [24] que dicha amplitud compleja satisface una distribución de densidad de probabilidad circular Gaussiana centrada en el origen.

$$P_{(A^{(r)}A^{(i)})}(A^{(r)}, A^{(i)}) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{A^{(r)2} + A^{(i)2}}{2\sigma^2}\right) \quad (2.10.1)$$

Esta expresión puede ser entendida como resultado de un recorrido aleatorio por el plano complejo.

Para el caso de un patrón de moteado completamente desarrollado, este corresponderá a una distribución de probabilidad circular Gaussiana con la suma de:

1. Un número suficientemente grande de pasos (o dispersores).
2. Y fasores en direcciones completamente aleatorios.

Sin embargo, si el número de áreas independientes de dispersión es muy bajo y las fases no están distribuidas uniformemente en  $[0, 2\pi]$ , la distribución de amplitud no satisfará la eq. 2.10.1. esto puede darse en el caso de un objeto con rugosidad limitada (liso).

Se sabe, que se puede medir directamente solo la intensidad del campo óptico de la onda.

Transformado la eq. 2.10.1. usando

$$I = \mathbf{A}\mathbf{A}^* = |\mathbf{A}|^2 = A^{(r)^2} + A^{(i)^2}$$

Y

$$\phi = \arctan\left(\frac{A^{(i)}}{A^{(r)}}\right) \quad (2.10.2)$$

o de manera equivalente:

$$A^{(r)} = \sqrt{I} \cos \phi$$

$$A^{(i)} = \sqrt{I} \sen \phi \quad (2.10.3)$$

Esto nos conduce a la función de densidad de probabilidad de la intensidad  $I$  y de la fase  $\phi$  de un campo de moteado completamente desarrollado y polarizado, tal que:

$$p_I(I) = \frac{I}{\langle I \rangle} \exp\left(-\frac{I}{\langle I \rangle}\right) \quad (I \geq 0) \quad (2.10.4)$$

$$p_\phi(\phi) = \frac{1}{2\pi} \quad (\phi \in [0, 2\pi]) \quad (2.10.5)$$

Donde el valor promedio de  $I$   $\langle I \rangle = 2\sigma^2$ . Subsecuentemente  $\langle \rangle$  representa el valor promedio de un parámetro específico, esto es, el valor esperado promediado sobre todas las posibles reacciones de la superficie microscópica del objeto.

La intensidad  $I$  sigue la bien conocida distribución exponencial negativa. Por lo que serán más probables los moteados oscuros, pero siempre hay también brillantes moteados. La probabilidad de distribución para las fases  $\phi$  es siempre la misma para todos los valores de las fases, lo cual significa que  $\phi$  es una variable aleatoria distribuida uniformemente. Incidentalmente, las dos variables son estadísticamente independientes.

El modelo presentado provee una simple y satisfactoria descripción de varias situaciones, explica las considerables variaciones en la intensidad las cuales son características del campo de moteado. La ecuación 2.10.6 nos permite calcular la

intensidad para distintos momentos, esto es, los valores esperados de  $I^n$  como sigue:

$$\langle I \rangle^n = n! \langle I \rangle^n \quad (2.10.6)$$

Podemos ver la desviación estándar de la intensidad es:

$$\sigma_I = \sqrt{\langle (I - \langle I \rangle)^2 \rangle} = \sqrt{\langle I^2 \rangle - \langle I \rangle^2} = \langle I \rangle \quad (2.10.7)$$

La cual es igual al valor promedio de la intensidad. Esto es por lo que en ocasiones se dice que un campo de moteado completamente desarrollado tiene contraste de “unidad”.

Existen dos geometrías principales bajo las cuales se observa el moteado, el moteado que se propaga libremente en el campo, que llena el espacio tridimensional frente a la superficie del objeto, el cual se llama “moteado objetivo”. Por otro lado, si se toma una imagen, el moteado también se presenta en el plano imagen, de tal forma que se llama “moteado subjetivo”. Previendo que el sistema de visión no resuelve espacialmente la superficie rugosa del objeto, la descripción estadística del moteado subjetivo permanece igual – el plano de la pupila del lente se puede pensar que juega el rol de la superficie rugosa del objeto-.

### 2.11 Método de sustracción para la obtención de los interferogramas.

Como nos dice [26], la separación de las franjas es inversamente proporcional al promedio de desplazamiento en la región de iluminación en el interferograma y la orientación de las franjas es perpendicular a la dirección del movimiento.

La adicción coherente de 2 campos de moteado provenientes de dos objetos dispersores resultara en un 3er. campo de moteado cuya distribución de intensidad es:

$$I(x, y) = I_{obj}(x, y) + I_{ref}(x, y) + 2\sqrt{I_{obj}(x, y)I_{ref}(x, y)}\cos[\psi(x, y)]$$

$$\psi(x, y) = \phi_{obj}(x, y) - \phi_{ref}(x, y) \quad (2.11.4)$$

Donde  $I_{obj}(x, y)$  y  $I_{ref}(x, y)$  son las distribuciones de intensidad del patrón de moteado en el plano imagen del objeto y el de referencia, respectivamente, y  $\psi(x, y)$  la diferencia de fase de ambos haces.

La ecuación 2.11.4 se puede representar de la siguiente forma:

$$I(x, y) = I_0(x, y)[1 + v(x, y)\cos(\psi(x, y))] \quad (2.11.5)$$

Donde  $I_0$  es la intensidad del fondo del interferograma en el plano imagen y  $v$  es la visibilidad de las franjas. Los cuales se definen como:

$$I_0(x, y) = I_{obj}(x, y) + I_{ref}(x, y) \quad (2.11.6)$$

$$v(x, y) = \frac{2[I_{obj}(x, y)I_{ref}(x, y)]^{1/2}}{I_{obj}(x, y) + I_{ref}(x, y)}$$

Estas expresiones son válidas tanto para la interferometría clásica como para la de moteado. En la interferometría clásica, las distribuciones espaciales de  $I_0(x, y)$ ,  $v(x, y)$  y  $\psi(x, y)$  son suaves y completamente determinísticas, mientras que en la interferometría de moteado son aleatorias y ruidosas. En la mayoría de los casos generales, todos los términos en la ecuación (2.11.5) están en función tanto del tiempo (t) como del espacio (x, y) en la imagen.

Asumamos que se da deformación, y esta cambia la fase  $\phi_0(x, y)$  en cada punto por una cantidad  $\Delta\phi(x, y)$ , pero no cambia la amplitud, entonces la distribución de intensidad se puede reescribir así, a partir de la ecuación (2.11.4).

$$I'(x, y) = I_{obj}(x, y) + I_{ref}(x, y) + 2\sqrt{I_{obj}(x, y)I_{ref}(x, y)} \cos[\psi(x, y) + \Delta\phi(x, y)] \quad (2.11.7)$$

Haciendo la sustracción de 2.11.7 de 2.11.5

$$I(x, y) - I'(x, y)$$

$$= 4\sqrt{I_{obj}(x, y)I_{ref}(x, y)} \sin \left[ \psi(x, y) + \frac{\Delta\phi(x, y)}{2} \right] \left[ \sin \frac{\Delta\phi(x, y)}{2} \right] \quad (2.11.8)$$

El primer factor seno da como resultado el ruido de moteado estocástico, el cual varía aleatoriamente de pixel a pixel, este ruido es modulado por el seno de la mitad de la diferencia de fase inducida por la deformación. Esta modulación de baja frecuencia del ruido de moteado de alta frecuencia se reconoce como el patrón de interferencia de moteado. Cuando  $\Delta\phi(x, y) = (2n + 1)\pi$  ( $n$  es un entero), los dos patrones de moteado interfieren destructivamente. Pero cuando  $\Delta\phi(x, y)$  toma valores de  $2n\pi$ , los patrones vuelven a interferir constructivamente.

Conceptualmente, cada pixel ha sido sometido a un ciclo completo de fase y termina con la misma distribución de brillo que antes. La posición de interferencia constructiva que se ha producido por los dos patrones de interferencia antes y después de la deformación se pueden detectar por el método general de la sustracción fotográfica. Este procedimiento resulta en la producción de franjas de interferencia de moteado.

## **Capítulo III. Desarrollo experimental.**

---

En este capítulo se describe el arreglo experimental a tratar con el fin de familiarizarnos con la nueva técnica de ESPI propuesta.

Ya dejamos establecido que las técnicas de ESPI son técnicas no invasivas y no destructivas por que permiten realizar distintas mediciones sin interferir en la medida por contacto físico entre el aparato que hace la medición y la muestra. El principio de aplicación de esta técnica es la superposición de dos haces de luz provenientes de una misma fuente, con esto se asegura una coherencia idéntica. Dichos haces, de referencia y de objeto, una vez superpuestos forman un interferograma. Como se observó en capítulos anteriores, el interferograma contiene información de la fase de la onda objeto y de la de referencia, así como de sus intensidades.

Un sistema ESPI, consiste en iluminar la superficie rugosa de un objeto con un haz láser. Al conseguir el patrón de moteado se utiliza el mismo como haz objeto del interferómetro propuesto; por otro lado, el haz de referencia proveniente de la misma fuente de luz que el haz objeto se hace interferir con el primero. La imagen resultante se registra en el CCD de la cámara y se almacena en forma de imagen digital, la cual se llama interferograma. Posteriormente, se induce una modificación en el estado del objeto (desplazamiento) o vibración, dicha modificación es interpretada como un desplazamiento de la superficie del objeto bajo estudio. Este desplazamiento provocará cambios en la superficie del objeto, lo cual generará cambios en el patrón de interferencia que es capturado por la cámara. Se genera otra imagen en el proceso y, como la anterior, se

almacena también para su posterior uso. Ambas imágenes se correlacionan mediante el método de sustracción fotográfica y dan como resultado un patrón de franjas, que también se puede nombrar como franjas de correlación.

### **3.1 Desarrollo del esquema experimental.**

Con este trabajo se busca aplicar una técnica novedosa de ESPI en el interior de objetos cilíndricos. El objetivo principal del arreglo propuesto, es detectar micro desplazamientos de la superficie interior de un objeto de prueba que toma la forma de un cilindro de PVC de 20 cm de diámetro. Los desplazamientos serán detectados mediante la aparición de franjas de correlación en las imágenes procesadas, las cuales, como se dijo antes, son indicativos inequívocos de modificaciones en el estado inicial del objeto de prueba. Por otro lado, se busca reducir el tamaño del instrumento por lo que se usará un solo espejo paraboloide.

### **3.2 Elementos ópticos básicos del arreglo experimental.**

Los elementos usados en este arreglo experimental se pueden dividir en dos grandes partes, los de naturaleza óptica y lo de naturaleza electrónica. Dentro de los elementos ópticos se encuentran las lentes, divisores de haz y los espejos; para los electrónicos tenemos la cámara y el computador para el procesamiento de las imágenes.

A continuación, se hará una breve descripción de algunos de estos elementos usados durante la experimentación:

1. **Espejos.** Son elementos de re-direccionamiento, utilizados para llevar el haz de luz a los puntos requeridos por el sistema. En esta propuesta se utilizaron dos tipos de espejos con características diferentes uno de otro, para el primero, son espejos planos que nos sirven para re-direccionar los brazos del interferómetro. Para los segundos, se usaron espejos parabólicos de primera superficie. Estos producen un campo de visión grande, ya que todos los rayos llegan paralelos al eje óptico y se reflejan pasando por el foco. Se muestran dos espejos paraboloides en la figura 13.



*Figura 13 Espejos parabólicos usados en el arreglo propuesto.*

2. **Objetivo de microscopio.** Debido a la naturaleza misma con que fueron concebidos, son un conjunto de lentes con distancia focal muy reducida y con una apertura numérica alta debido a su aplicación, esto es, la amplificación de objetos pequeños. En nuestro caso, son muy útiles para expandir los haces de luz provenientes de ciertas fuentes y que nos sirven para iluminar los objetos de estudio. Como referencia podemos mencionar, que un objetivo de microscopio con amplificación baja, digamos 5X, nos proporciona una expansión de haz reducida, alrededor de 2

cm a dos metros del objetivo; sin embargo, un objetivo de microscopio con amplificación de 60X y apertura numérica alta, nos proporciona una expansión de haz de unos 30 cm a 2 m de distancia del objetivo.

En el caso particular, para expandir la iluminación del objeto, se utilizó un objetivo de microscopio modelo MV – 40X, con apertura numérica de 0.65 NA y una longitud focal de 4.4 mm.

Para expandir el haz de referencia, se utilizó un objetivo de microscopio MV -20X, con apertura numérica 0.40 NA y longitud focal de 8.5 mm.

3. **Divisores de haz.** Para el arreglo se usaron dos divisores de haz de cubo modelo 20BC17MB.1 de Newport Corporation no polarizados de 400-700 nm, R/T=45/45 de 50.8 mm, los cuales cuentan con una capa de dieléctrico sobre la hipotenusa. También cuentan con una capa anti-reflejante de múltiples capas en cada cara del divisor del haz para producir la eficacia de transmisión máxima. Como ya se vio en capítulos anteriores, los divisores de haz se utilizan en interferometría para generar dos ondas altamente coherentes entre sí, ya que provienen de la misma fuente.
4. **Lente.** Una lente es un dispositivo que concentra los haces de luz y forma una imagen en el plano del CCD de la cámara. En el arreglo se trabajó con un lente telefoto manual con magnificación primaria de 10X.
5. **Pinholes.** Son elementos de filtrado de la luz, estos se colocan el foco del objetivo de microscopio para lograr un haz extendido. De esta forma se logra un haz

homogéneo. En esta técnica se utilizaron dos pinholes modelo 910PH-15, de apertura numérica 15 y 910PH- 10, de apertura numérica 10, para el filtrado de la luz del objeto; y para el filtrado de referencia se utilizó un pinole modelo 910PH- 20, de apertura numérica 20.

6. **Difusor.** Elemento que difunde el haz de luz y controla el comportamiento de la emisión para que esta tenga una mayor eficiencia de transmisión. En el arreglo se utilizó un difusor de 30°.
  
7. **Filtro espacial.** En el arreglo se utilizó un filtro espacial de 3 puntos de ajuste, este nos permite más elementos de movimiento para obtener la iluminación máxima para el trabajo del interferómetro.
  
8. **Etapa milimétrica (Milimetric Stage).** Se utilizó una etapa milimétrica manual de 3 ejes para el montaje del objeto en estudio, de esta forma los movimientos estarán controlados.

### **3.3 Elementos electrónicos básicos del arreglo experimental.**

Esta parte se refiere a la descripción de los elementos con funciones específicas tal como la captura de imágenes, el procesamiento de las mismas y el despliegado de los resultados; aunado al sistema de iluminación del mismo.

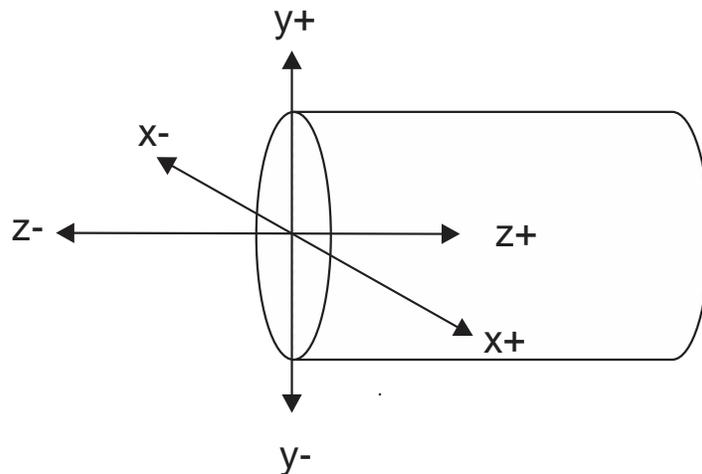
9. **Fuente de iluminación.** Se utilizó una fuente de luz coherente que corresponde a la más utilizada en las técnicas ESPI, el LASER (Amplificación de Luz por Emisión Estimulada por Radiación). El láser empleado en este arreglo es un (He-Ne), de longitud de onda de 632 nm (rojo) y una potencia nominal de 20 mW.
  
10. **Cámara CCD 2** La cámara utilizada es una marca thorlabs DCU223C, a color, con resolución de 1024x768, velocidad de captura de 30 fps.
  
11. **Actuador piezoeléctrico.** Este es un dispositivo al que se le aplica tensión mediante una fuente de voltaje y al deformarse por el efecto piezoeléctrico, produce un desplazamiento del orden de las micras con gran precisión, ya que el desplazamiento está en proporción directa con el voltaje aplicado.
  
12. **Procesamiento de imágenes.** Este se llevó a cabo con una laptop marca Dell. La adquisición de las imágenes se hizo mediante el programa propio de ThorLabs, y para el procesamiento de los videos se utilizó Matlab.

### **3.4 Descripción de la nueva técnica ESPI panorámica.**

El sistema propuesto utiliza un espejo parabólico, este, recibe el haz del objeto. Dado que se trata de una técnica ESPI, se requiere de una imagen de referencia con el objeto en una posición específica. Después, se induce un cambio en el estado inicial del objeto; esto generará variaciones en el patrón de moteado capturado por la CCD de la cámara. Se captura una imagen después de realizado el cambio de estado y se almacena en la PC. Esta nueva imagen se correlaciona con la imagen de referencia y se obtienen las franjas

de correlación (Correlograma). Estas franjas contienen información inherente al cambio inducido en el estado inicial del objeto.

Una vez capturado por la CCD de la cámara el primer interferograma, se realiza un cambio de estado en el objeto, que para nuestro arreglo es un tubo de PCV, del orden de las micras (0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 micras). Este movimiento se realiza de manera controlada y se muestra un esquema con las referencias de los ejes de movimiento para el tubo de PVC (figura 14). Como podemos observar en el esquema, el eje Z, corresponde al eje paralelo al banco óptico (axial a la cámara); el eje Y, representa el cambio de posición vertical del objeto; y el eje X, el cambio horizontal y perpendicular al eje Z.



*Figura 14 Esquema que muestra los ejes coordenados relacionados con el movimiento del objeto.*

Ya que se tienen los interferogramas de referencia y los que contienen el cambio de estado, se correlacionan mediante la técnica de sustracción fotográfica. Esto es, mediante la diferencia de intensidades obtendremos zonas con una máxima correlación (franjas oscuras) y zonas con mínima correlación (franjas brillantes). Este patrón de franjas, está asociado a la magnitud y dirección del desplazamiento, de tal forma que podemos hacer

mediciones en el plano y fuera del plano. Es decir, el desplazamiento se visualiza como un patrón de franjas de correlación, ya que representa un indicativo inequívoco de los cambios en la superficie del objeto en estudio.

El procesamiento de las imágenes se realizó en Matlab mediante un script hecho para tales efectos.

Como se puede observar, el procesamiento digital parte de la captura de una imagen del objeto en estado inicial, la imagen de referencia, después, se induce un cambio de estado y se toma otra captura. Se aplica la diferencia de intensidades punto a punto calculada en valor absoluto. A las imágenes que resultan de esta sustracción se les suele llamar franjas de correlación. La siguiente ecuación nos muestra las operaciones realizadas:

$$|I_{obj} - I_{ref}| = I_m |\cos(\phi_{obj} - \phi_{ref})|$$

Donde:

$I_{obj}$  es la intensidad del haz objeto.

$I_{ref}$  es la intensidad del haz de referencia.

$\phi_{obj} - \phi_{ref}$  es la diferencia de fase de ambos haces.

### **3.5 Arreglo experimental de la técnica panorámica ESPI de partida.**

La figura 15 muestra la estructura del arreglo experimental de la técnica de partida [1]. En esta, se muestra el uso de dos espejos parabólicos. El espejo Ep1, es el espejo que recibe la iluminación de la fuente en el brazo objeto del interferómetro; el espejo Ep2, capta la

energía de espejo Ep1 que incide en las paredes del objeto cilíndrico formando un anillo característico de este dispositivo. Posteriormente, el lente de la cámara está enfocado en la superficie del cilindro mediante el reflejo del espejo Ep2. De manera simultánea, el haz de referencia viaja por fuera el cilindro para pasar por un filtro neutro de densidad variable, un objetivo de microscopio que abre el haz y un espejo plano que lo re-direcciona a un difusor, de ahí, al divisor de haz para incidir directamente en al CCD de la cámara.

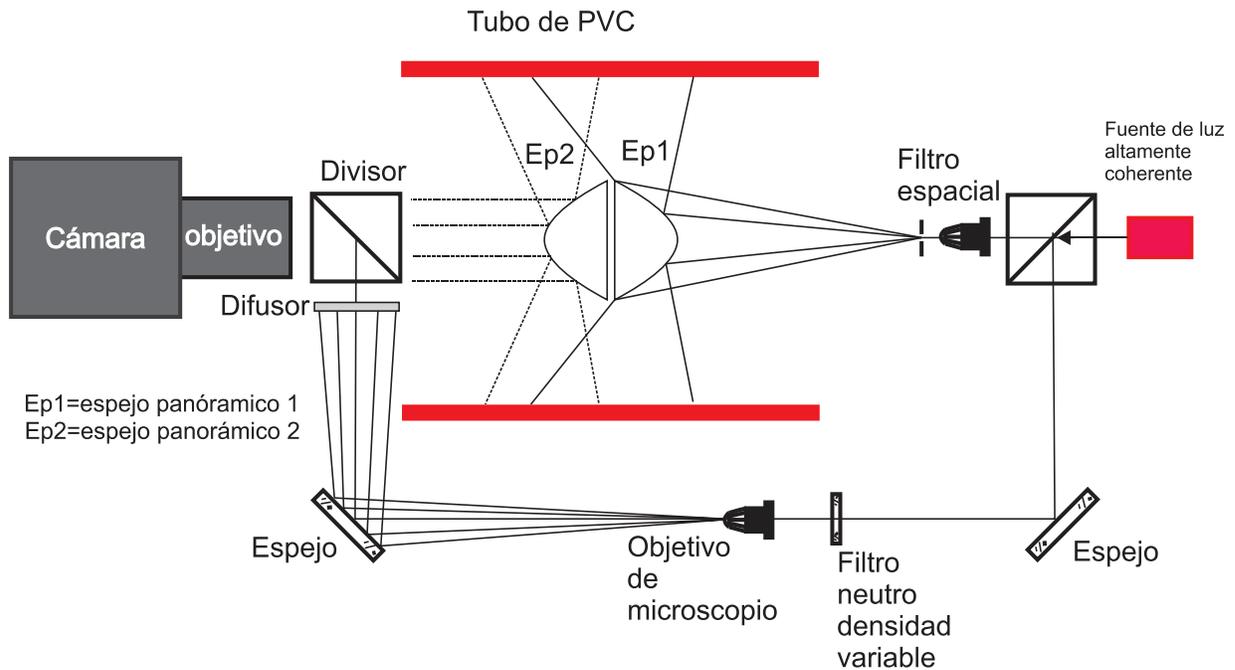


Figura 15 El arreglo muestra cómo están colocados los componentes ópticos, así como los opto-electrónicos

En la figura 16, se muestra otra configuración del arreglo óptico anterior, cuyas diferencias son la adición de un diafragma para controlar la zona de iluminación en el espejo Ep1 y otro filtro de densidad neutra con el que se manipula la intensidad de iluminación en el difusor del brazo de referencia.

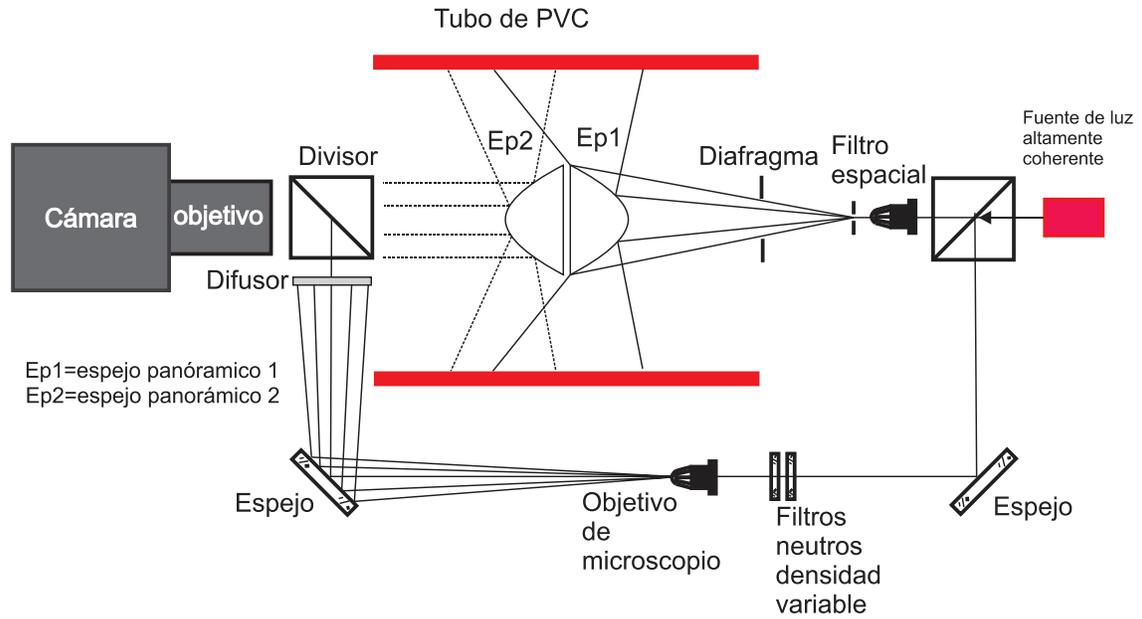


Figura 16 Arreglo armado en UPT por Liline Daniel Canales Hernández.

La siguiente imagen muestra el arreglo físico en la mesa holográfica del laboratorio de óptica en la Universidad Politécnica de Tulancingo.

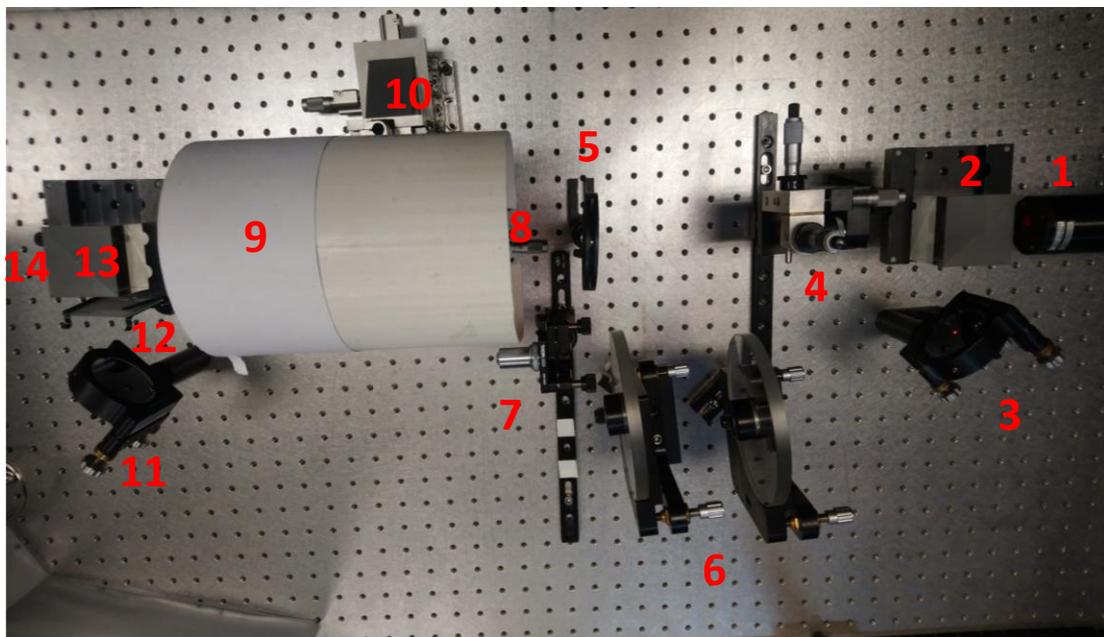


Figura 17 Imagen del arreglo óptico armado en el laboratorio de óptica de la UPT.

La figura 17 muestra los siguientes elementos:

1. Láser de He-Ne de 632 nm.
2. Cubo divisor de haz 45-45.
3. Espejo plano.
4. Filtro espacial con objetivo de microscopio 40x y pinhole de 15  $\mu\text{m}$ .
5. Diafragma de apertura variable.
6. Filtros neutros de densidad variable.
7. Objetivo de microscopio 20x.
8. Espejos paraboloides Ep1 y Ep2.
9. Objeto de estudio (tubo de pvc).
10. Etapa micrométrica de tres ejes.
11. Espejo plano.
12. Difusor.
13. Cubo divisor de haz 45-45.
14. Cámara a color con lente telefoto 10X.

En la figura 18, se observa una imagen que contiene información proveniente del software de captura de la cámara utilizada, en ella se muestra un interferograma de referencia y a los lados, gráficos que representan la intensidad en una zona determinada de la imagen. El gráfico superior derecho muestra la intensidad en una línea vertical de la imagen y el gráfico inferior derecho muestra los valores de una línea horizontal de la misma. El recuadro amarillo es dibujado, con una herramienta proporcionada por el mismo software, para ayudar a localizar la zona donde se esperan franjas de correlación. Como se observa, la intensidad de ambos gráficos está disparada fuera de los mismos, esto es por que buscaba obtener el mejor contraste de franjas.

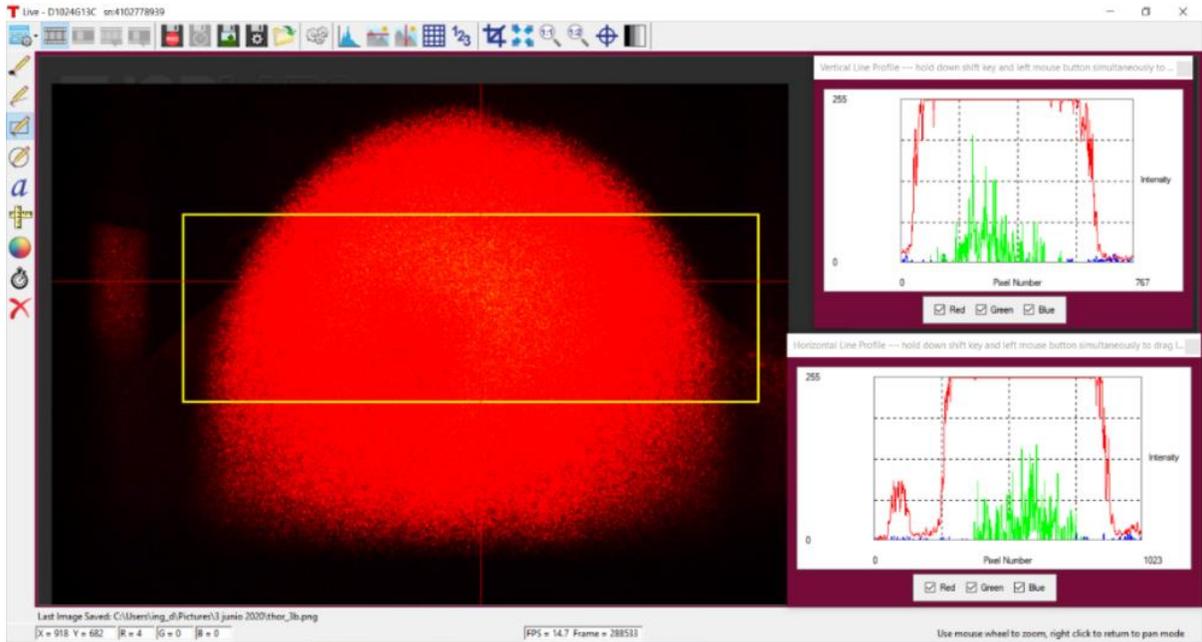
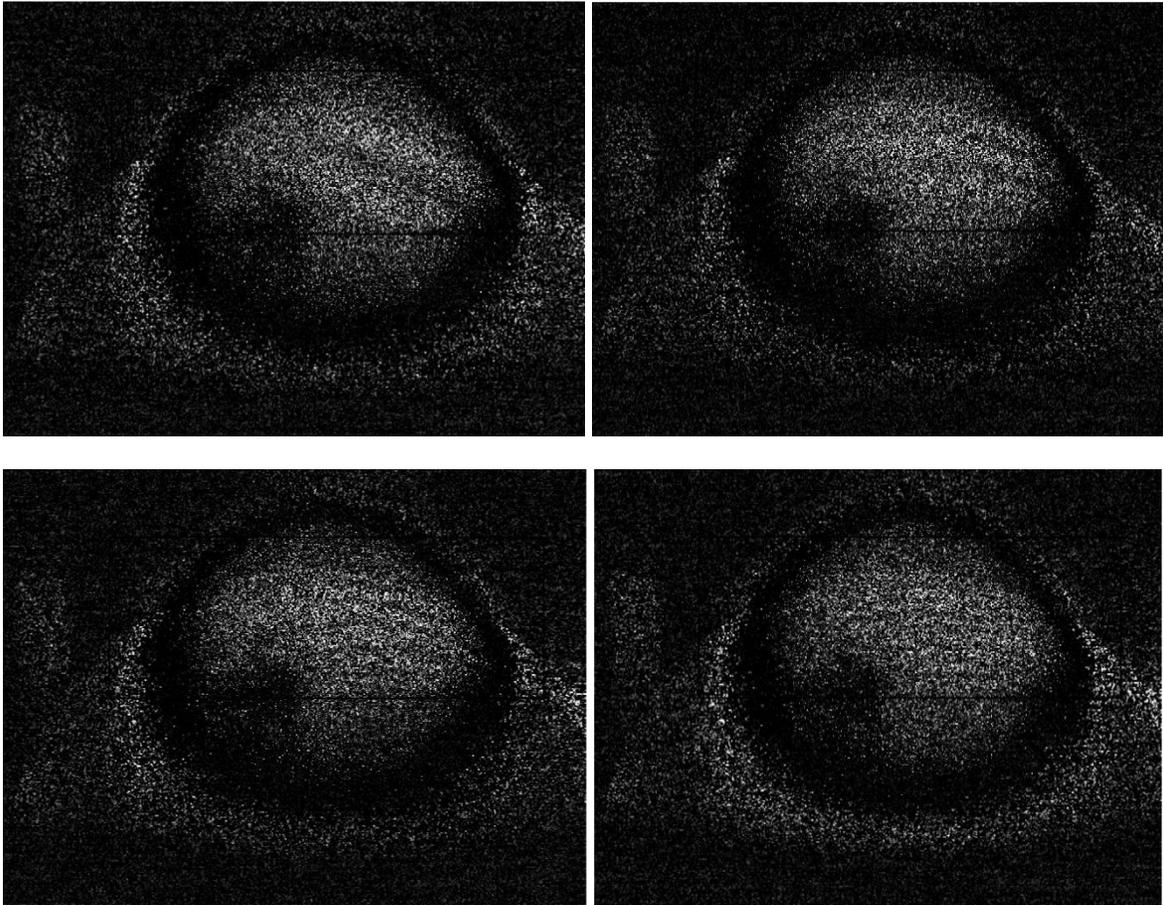
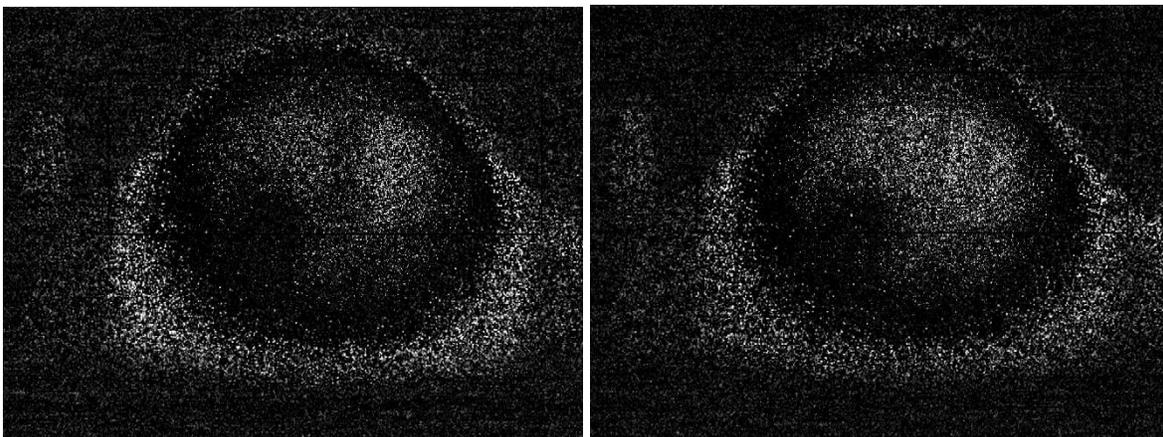


Figura 18 Interferograma obtenido con el arreglo de la figura 16 y gráficos de la medición de intensidad horizontal y vertical en la zona mostrada.

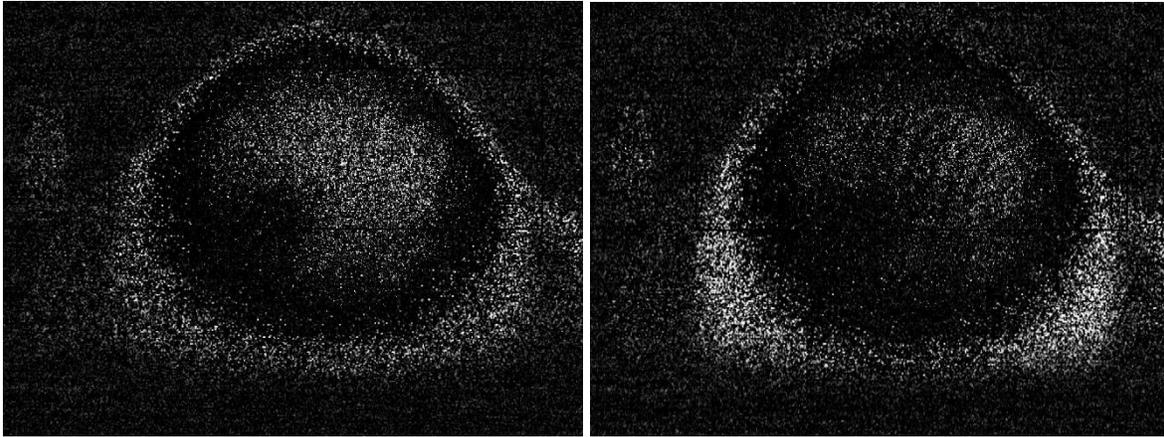
En las figuras 19, 20, 21 y 22 se muestran las imágenes de los patrones de franjas de correlación obtenidos con este arreglo, esto, como resultado del procesamiento digital. En ella, se observan patrones característicos de interferencia de moteado, pero con bajo contraste. Encontramos que este bajo contraste se debe, entre otras causas, a la diferencia de niveles de intensidad entre los haces de referencia y objeto; también, el bajo contraste, tiene una relación directa con la intensidad de la fuente de iluminación usada.



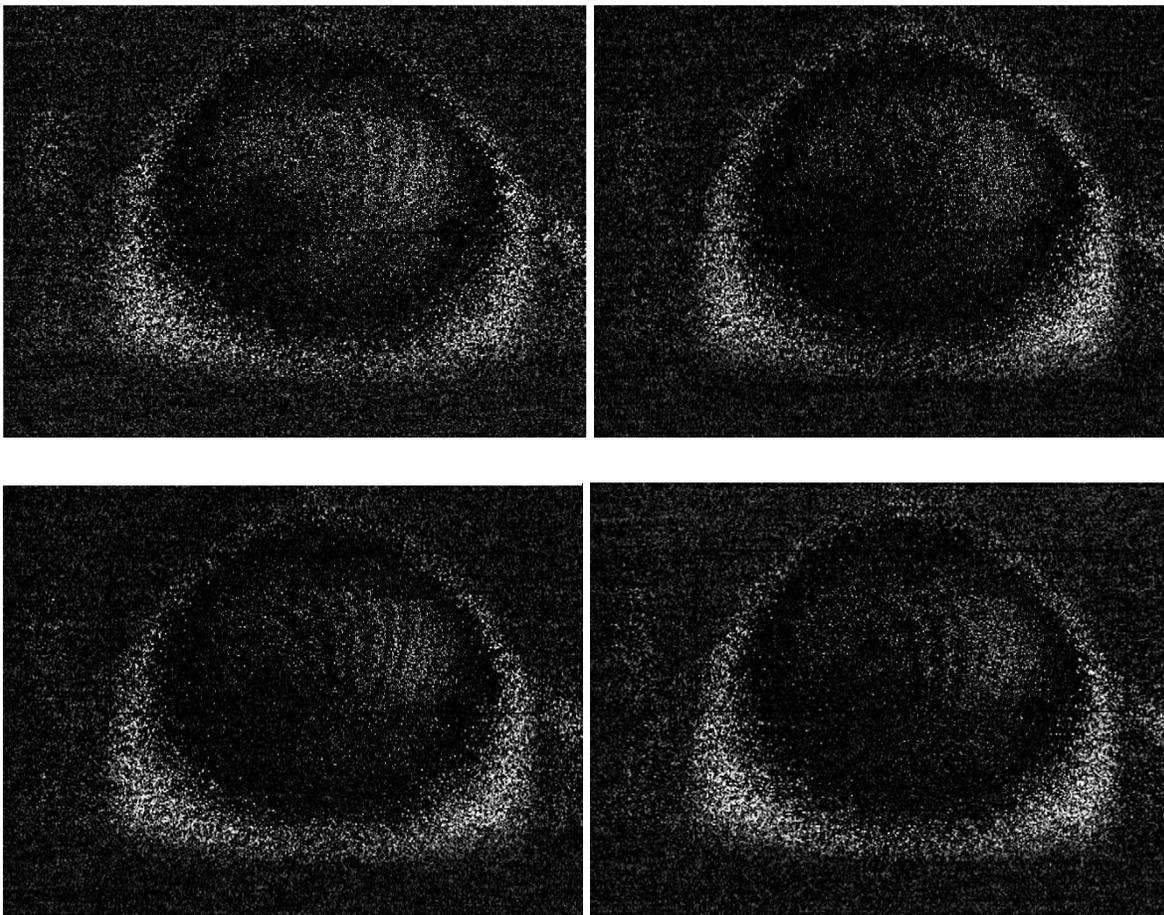
*Figura 19 Patrones de interferencia de moteado correspondientes a un desplazamiento en el eje z (axial a la cámara). Desplazamiento de 0.1, 0.2, 0.3 y 0.4  $\mu\text{m}$  respectivamente.*



*Figura 20 Patrones de interferencia de moteado correspondientes a un desplazamiento en el eje x. Desplazamientos de 0.1 y 0.2  $\mu\text{m}$  respectivamente.*



*Figura 21 Patrones de interferencia de moteado correspondientes a un desplazamiento en el eje x. Desplazamientos de 0.3 y 0.4  $\mu\text{m}$  respectivamente.*



*Figura 22 Patrones de interferencia de moteado correspondientes a un desplazamiento en el eje y. Desplazamientos de 0.1, 0.2, 0.3 y 0.4  $\mu\text{m}$  respectivamente.*

En cualquier arreglo óptico que sea usado para interferometría, se busca minimizar la diferencia de camino óptico. Para este arreglo obtuve una diferencia de camino geométrico de 7.7 cm. Esto permite observar patrones de interferencia mejor definidos, es decir, con mejor contraste en las franjas de correlación.

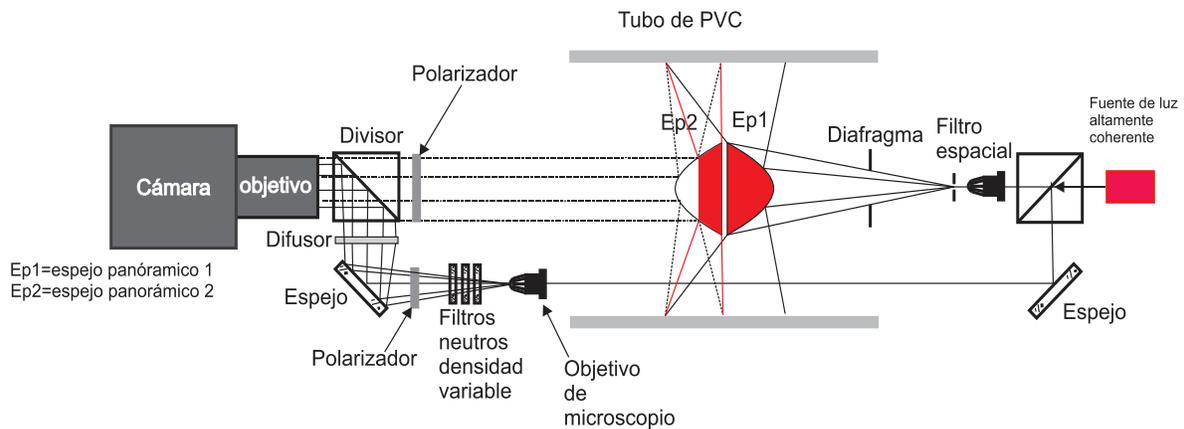
$$|GPL_{ref} - GPL_{obj}| = 7.7 \text{ cm}$$

Estuve probando con distintas configuraciones para este hecho, lo que resultó en el arreglo óptico mostrado anteriormente.

### **3.6 Arreglo experimental alternativo de la nueva técnica panorámica ESPI.**

Como parte del aprendizaje para desarrollar este interferómetro, nos dimos a la tarea de modificar el diseño original con el fin de obtener mejor contraste de franjas. Esto fue posible gracias a la adición de algunos elementos al arreglo original. Se agregaron dos polarizadores a la salida de ambos brazos del interferómetro antes de llegar al segundo divisor de cubo y otro filtro neutro. Este último elemento, me permitió incrementar en gran medida el control sobre la intensidad del haz de referencia.

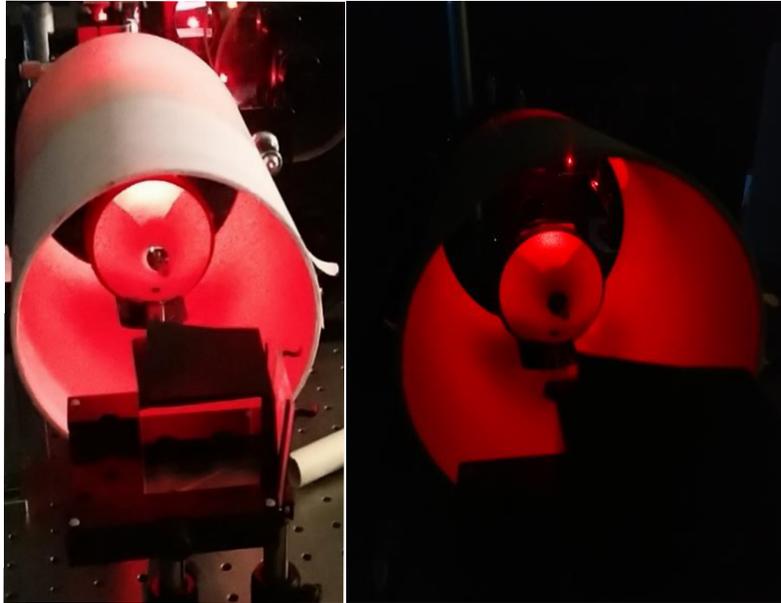
La figura 23 muestra el arreglo experimental con ciertos cambios, como el uso de tres filtros neutros para controlar la intensidad del haz de referencia, el uso de dos polarizadores y un diafragma antes del espejo Ep1 para guiar la iluminación a la parte superior de dicho espejo.



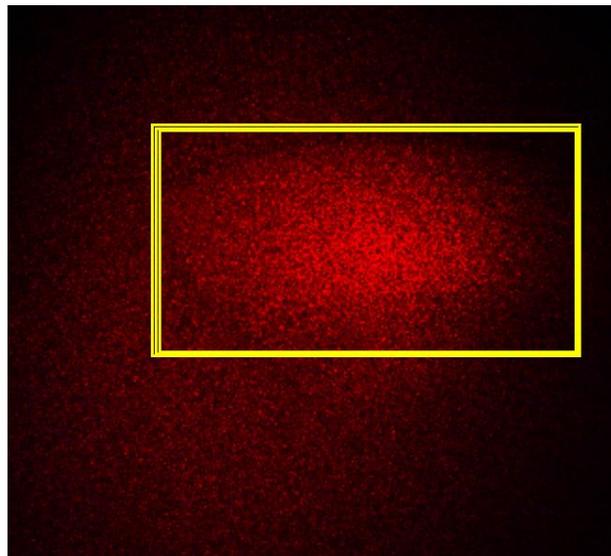
*Figura 23 Arreglo experimental desarrollado en el laboratorio de la Universidad Politécnica de Tulancingo por L. Daniel Canales Hernández*

En este diagrama se muestra el estado ideal de iluminación al espejo Ep1 (en color rojo); el haz del brazo objeto incide de lleno en el espejo Ep1, y dado que la fuente de iluminación usada en este proyecto es de 20 mW, el área iluminada solo es la sección superior del espejo, esto, en el afán de maximizar la intensidad de iluminación en el mismo, ya que en la experimentación se observó que el haz objeto, al ser reflejado por el tubo, pierde intensidad, y esto es por que parte de la energía que llega al objeto de estudio es absorbida por él mismo. Tomando en cuenta lo anterior, el haz de referencia se hace pasar por dentro del objeto de estudio, esto tiene dos implicaciones; la primera, no se afecta la medición, ya que el haz del objeto solo incide en la parte superior del espejo Ep1; la segunda, reducir la diferencia de camino óptico.

La figura 24 muestra la zona iluminada por el láser en el espejo Ep2 como resultado de la incidencia del haz objeto en el espejo Ep1. Se decidió iluminar solo la parte superior del espejo EP1 en el afán de mejorar el contraste de franjas, esto, debido a la potencia de trabajo del láser.



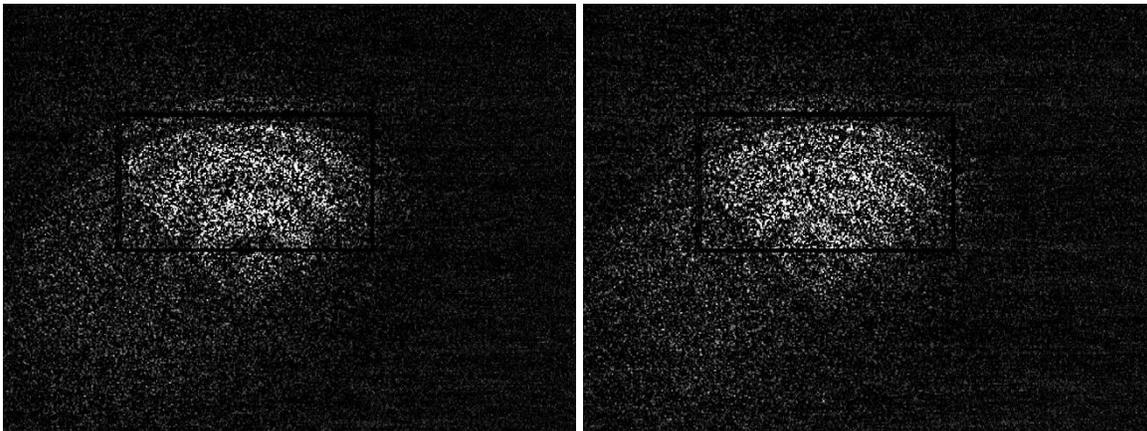
*Figura 24* Imagen del espejo Ep2 recibiendo el haz del espejo Ep1 que se refleja en el cilindro. La primera con luz encendida y la segunda con luces apagadas.



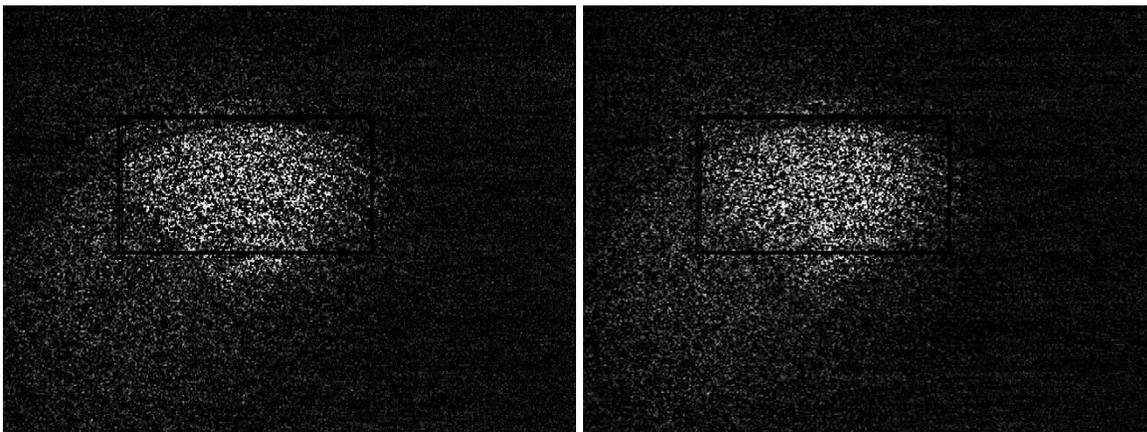
*Figura 25* Interferograma proporcionado por el arreglo de la figura 23.

La figura 25 muestra una imagen del interferograma obtenido a partir del arreglo de la figura 23. El recuadro amarillo se utilizó para tener una idea de donde deben de aparecer las franjas de interferencia.

A continuación, los resultados de este arreglo.



*Figura 26 Patrones de interferencia obtenidos a partir del arreglo de la figura 23. Desplazamientos en el eje z de 0.1 y 0.2  $\mu\text{m}$  respectivamente.*



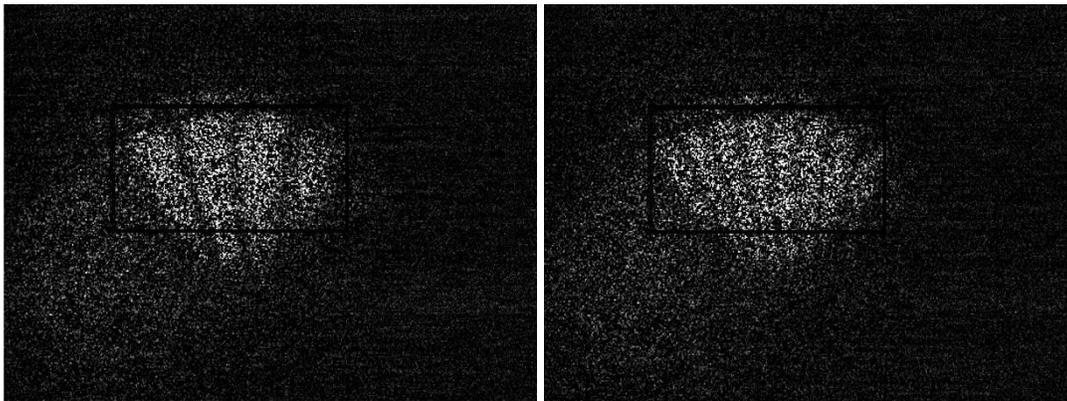
*Figura 27 Patrones de interferencia obtenidos a partir del arreglo de la figura 23. Desplazamientos en el eje z de 0.3 y 0.4  $\mu\text{m}$  respectivamente.*

Se puede observar fácilmente la mejoría en el contraste de las franjas. Esto nos permite observar los patrones de interferencia de moteado característicos para este movimiento en el eje z axial al eje de la cámara. Observamos, también como cambia el patrón con cada micro-movimiento. Las franjas muestran la evolución espacial de la diferencia de fase y esta

última va cambiando conforme el desplazamiento aumenta con respecto a la imagen de referencia.

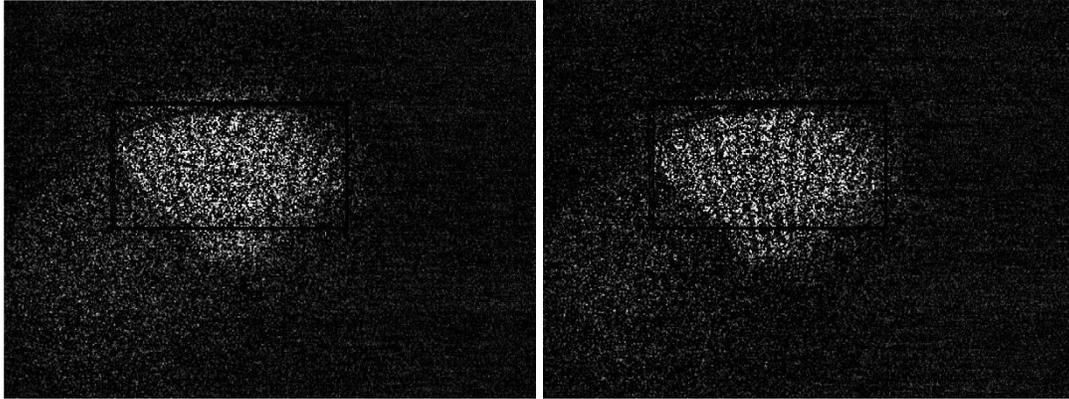
En las imágenes también podemos observar que las franjas aparecen concéntricas al centro del espejo, lo cual es característico en este movimiento en el eje z. De forma tenue, se puede ver el contorno del espejo EP2.

Se muestra a continuación las imágenes correspondientes al movimiento en el eje x.



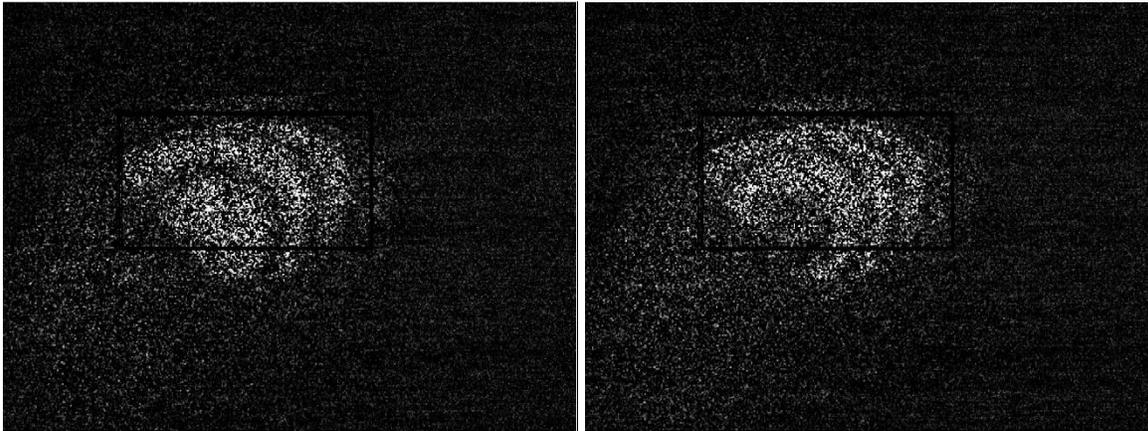
*Figura 28 Patrones de interferencia obtenidos a partir del arreglo de la figura 23. Desplazamientos en el eje x de 0.1 y 0.2  $\mu\text{m}$  respectivamente.*

En la figura 28, se ve claramente cómo cambia la orientación de las franjas con el cambio de eje para realizar los desplazamientos. En este caso, las franjas son perpendiculares a las obtenidas en el eje z.



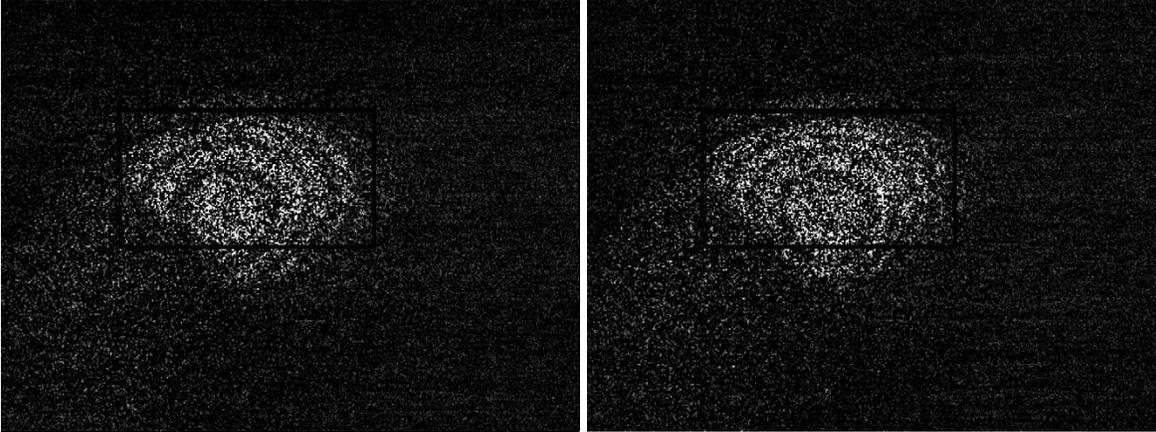
*Figura 29 Patrones de interferencia obtenidos a partir del arreglo de la figura 23. Desplazamientos en el eje x de 0.3 y 0.4  $\mu\text{m}$  respectivamente.*

Para los desplazamientos en el eje y:



*Figura 30 Patrones de interferencia obtenidos a partir del arreglo de la figura 23. Desplazamientos en el eje y de 0.1 y 0.2  $\mu\text{m}$  respectivamente.*

En la figura anterior podemos observar cómo cambia el patrón con respecto a aquellos obtenidos para los ejes x y z.



*Figura 31 Patrones de interferencia obtenidos a partir del arreglo de la figura 23. Desplazamientos en el eje y de 0.3 y 0.4  $\mu\text{m}$  respectivamente.*

Para este arreglo obtuve una diferencia de camino geométrico de 1.2 cm. Esta diferencia me permitió obtener las franjas con la calidad antes mostrada.

$$|GPL_{ref} - GPL_{obj}| = 1.2 \text{ cm}$$

### **3.7 Propuesta número uno de reconfiguración para la nueva técnica panorámica ESPI.**

La primera reconfiguración al modelo de base es la que propone el Dr. Juan B. Hurtado Ramos y se presenta en la figura 32. Para este arreglo solo adicioné un polarizador y un difusor a la idea original. En ella se muestran los elementos a partir de los cuales se pretende encontrar franjas de correlación utilizando un solo espejo.

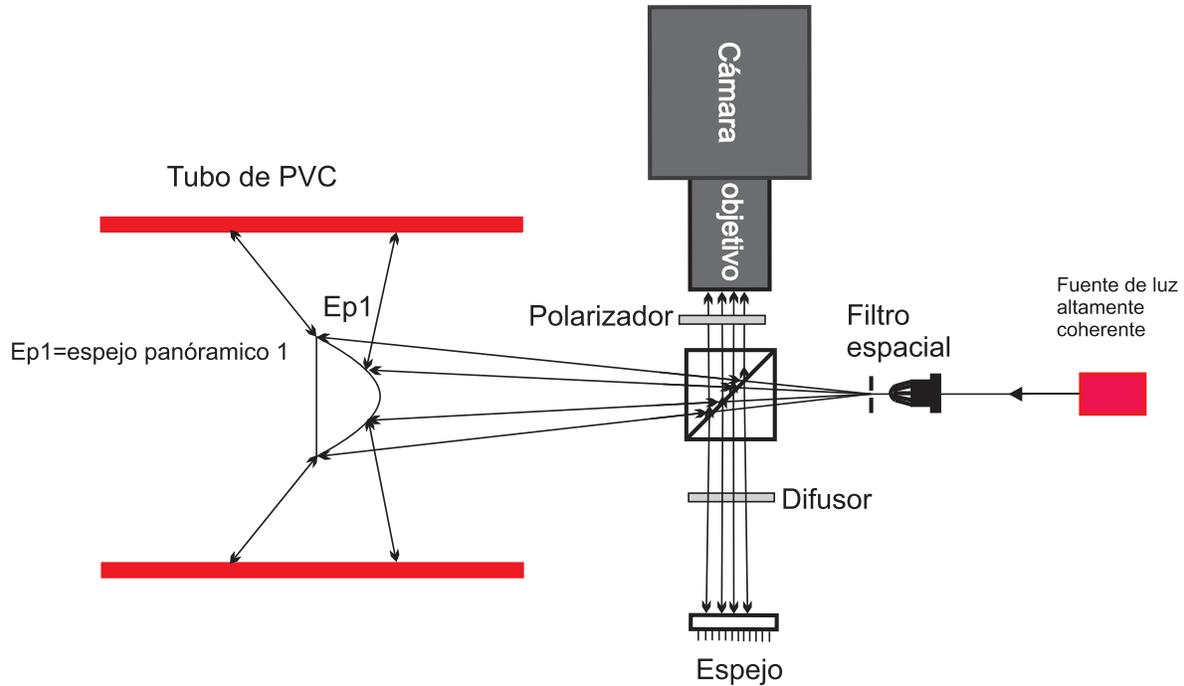
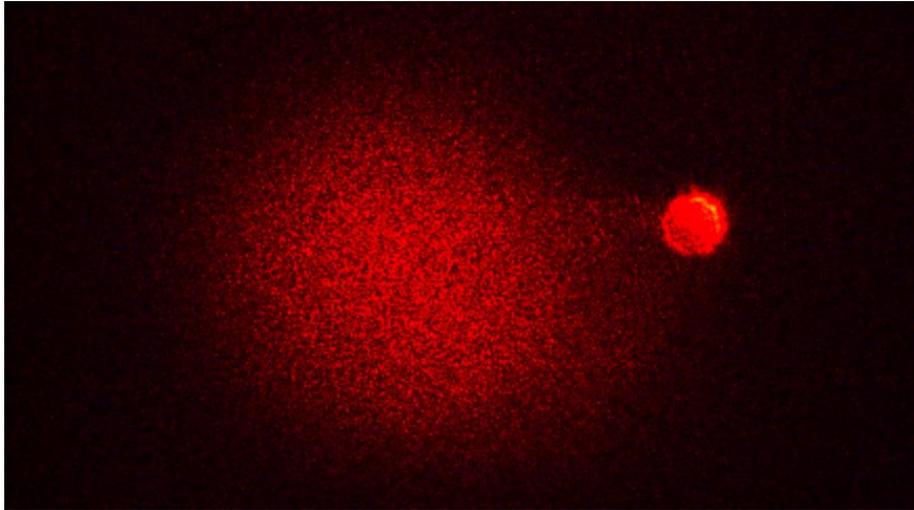


Figura 32 Arreglo óptico propuesto por el Dr. Juan B. Hurtado Ramos y armado en la UPT. Reconfiguración número 1.

Este arreglo nos permite utilizar un solo espejo, y requiere menos elementos que la configuración número dos, como se verá en el siguiente epígrafe.

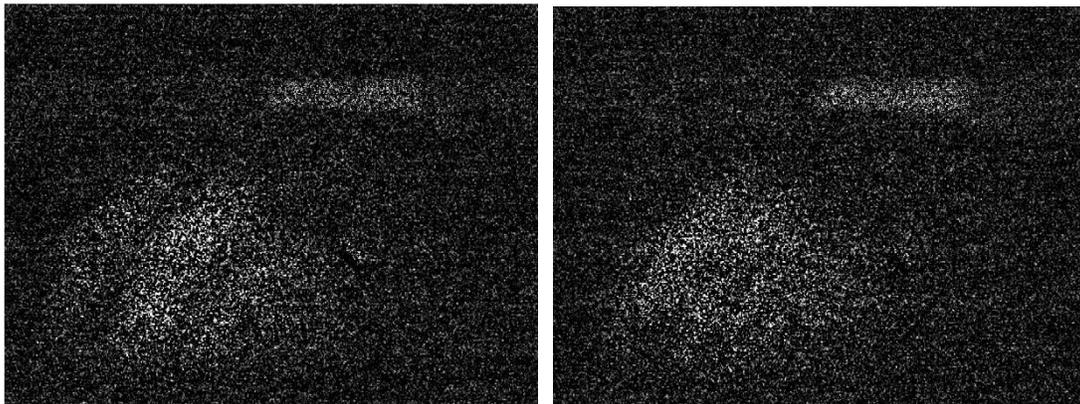
Para este arreglo, el haz que sale del filtro espacial incide en el cubo divisor y se divide en dos, uno va al espejo plano y regresa pasando de largo por el divisor y llegando a la cámara. El otro, llega al espejo Ep1 se refleja a la superficie del objeto de estudio y es nuevamente captado por este espejo, esta imagen es captada por la cámara por medio del mismo divisor. Los dos haces, tanto referencia como objeto llegan a un polarizador antes de entrar a la cámara.

La figura 33 muestra el interferograma de referencia, el cual nos servirá de comparación para obtener el patrón de interferencia correspondiente. En dicha figura se muestra en punto más intenso, este resulta ser un reflejo del divisor.

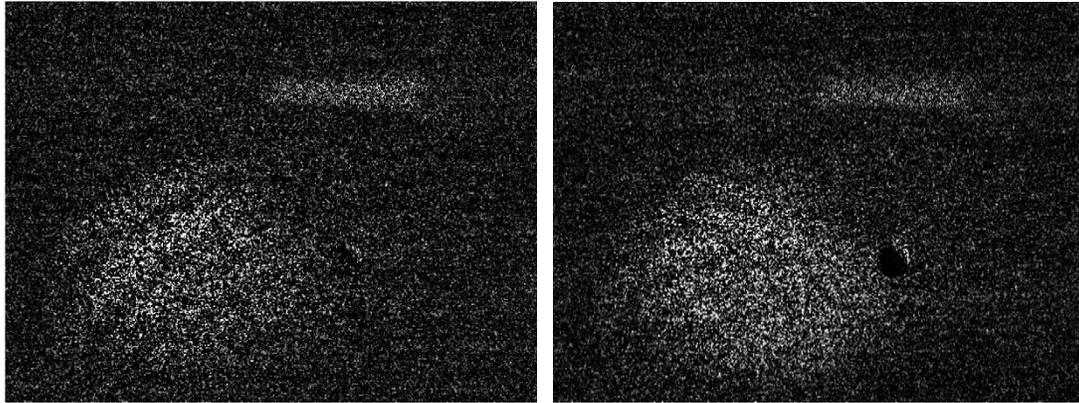


*Figura 33 Interferograma de referencia para la configuración número 1.*

Los resultados obtenidos para este arreglo son los siguientes.



*Figura 34 Patrones de interferencia obtenidos a partir del arreglo de la figura 32. Desplazamientos en el eje z de 0.1 y 0.2  $\mu\text{m}$  respectivamente.*



*Figura 35 Patrones de interferencia obtenidos a partir del arreglo de la figura 32. Desplazamientos en el eje z de 0.3 y 0.4  $\mu\text{m}$  respectivamente.*

Si bien se obtuvieron franjas de correlación en el eje  $z$ , en los ejes  $x$  y  $y$ , no se obtuvieron franjas visibles.

Esta configuración nos permite utilizar menos elementos para obtener los resultados.

La diferencia de camino geométrico para esta reconfiguración número 1:

$$|GPL_{ref} - GPL_{obj}| = 1.2 \text{ cm}$$

### **3.7 Propuesta número 2 de reconfiguración para la nueva técnica panorámica ESPI.**

Para la segunda configuración, se muestra un arreglo diseñado por el autor de esta tesis. Aunque tiene más elementos y su complejidad aumenta, nos permite tener control absoluto sobre la intensidad del haz de referencia.

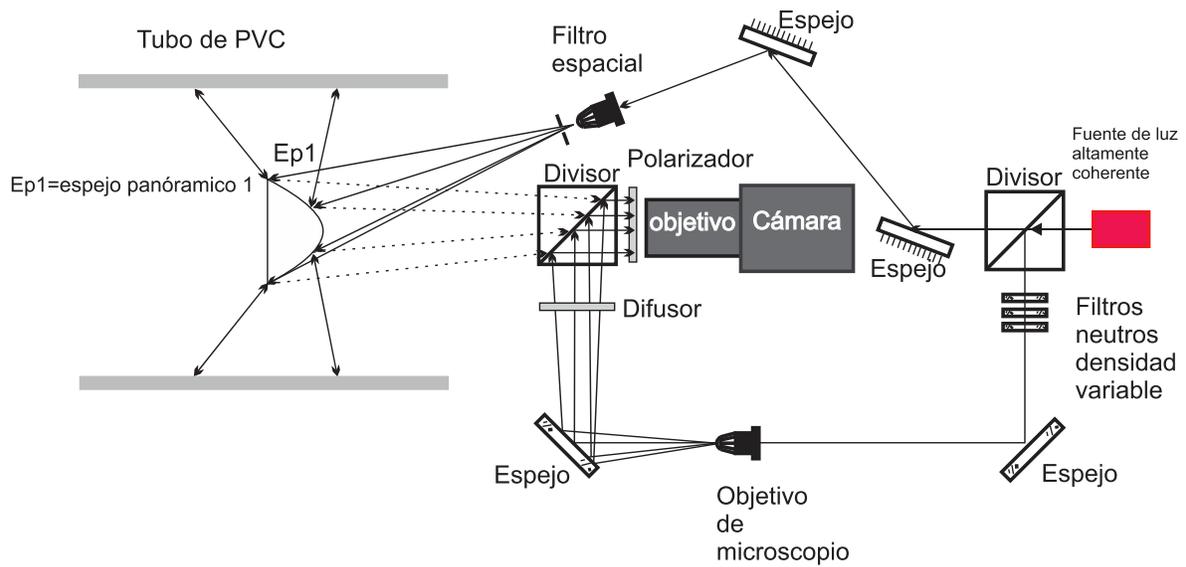


Figura 36 Arreglo óptico 2a configuración. Diseñado por Liline Daniel Canales Hernández en la UPT.

Las características de este diseño son; en primer lugar, el uso de un solo espejo paraboloide; en segundo lugar, el haz que ilumina al objeto entra de manera diagonal; tercero, nos permite controlar la intensidad del haz de referencia.

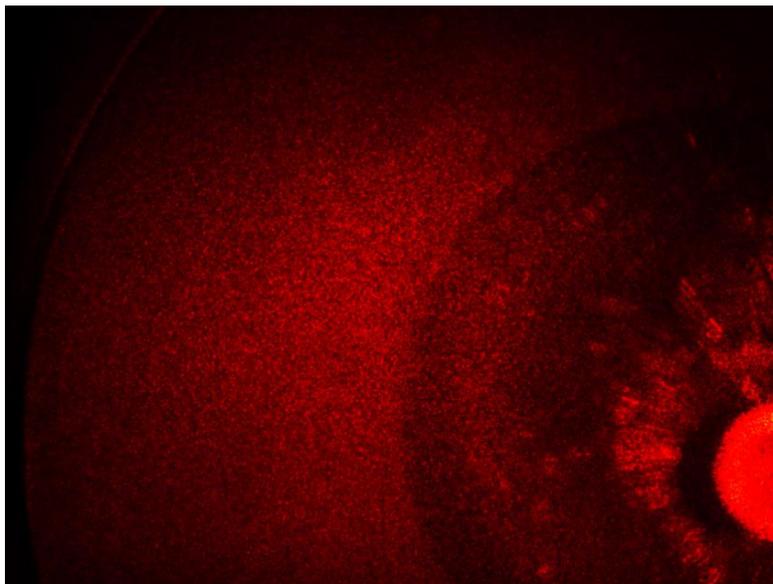
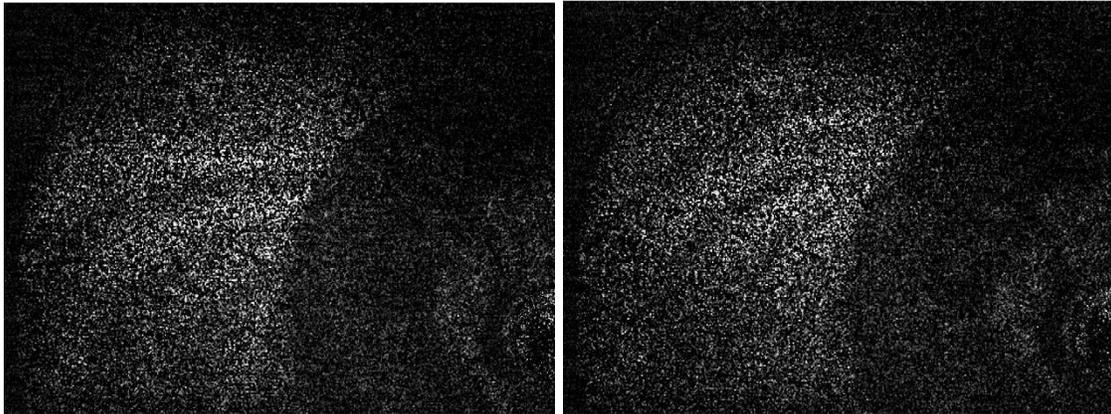


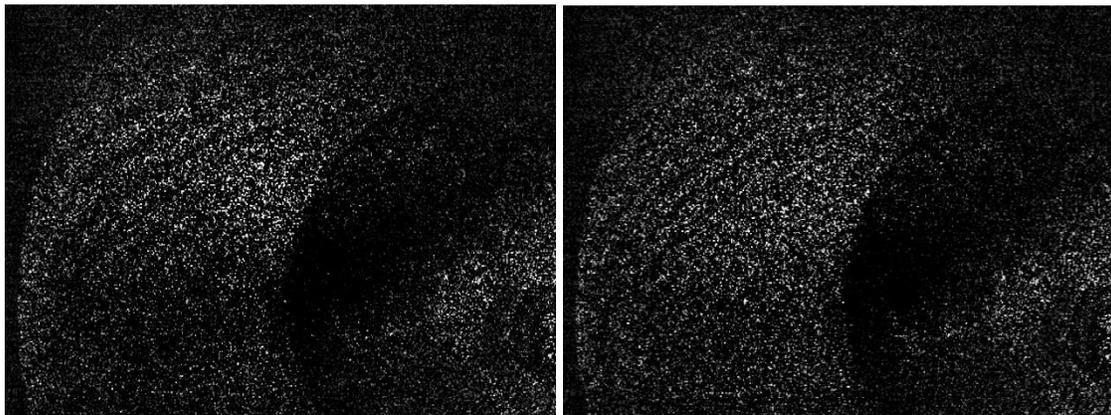
Figura 37 Imagen del interferograma de referencia para la configuración número dos del arreglo óptico de la figura 36.

La figura 37 muestra el interferograma de referencia, en esta configuración nos fué posible utilizar niveles de intensidad muy semejantes para ambos brazos del interferómetro. Esto da como resultado mejor contraste en las franjas de correlación.

Aquí los resultados.



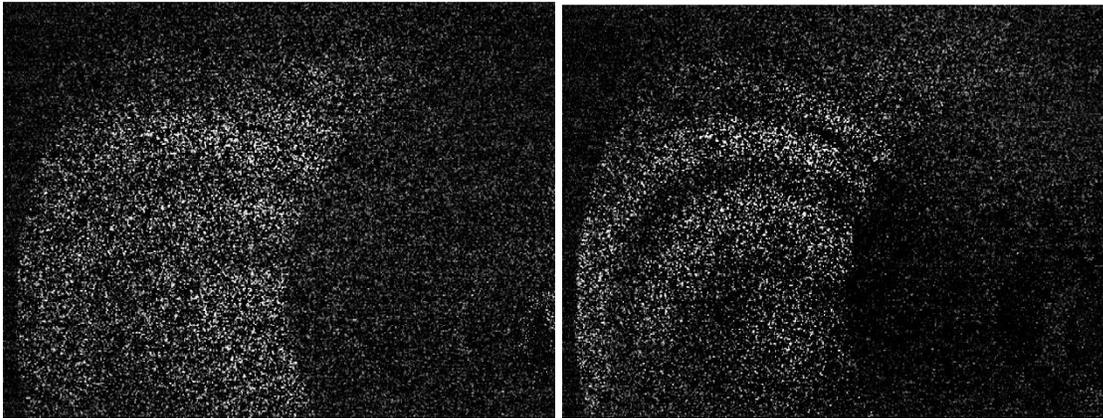
*Figura 38 Patrones de interferencia obtenidos a partir del arreglo de la figura 36. Desplazamientos en el eje z de 0.1 y 0.2  $\mu\text{m}$  respectivamente.*



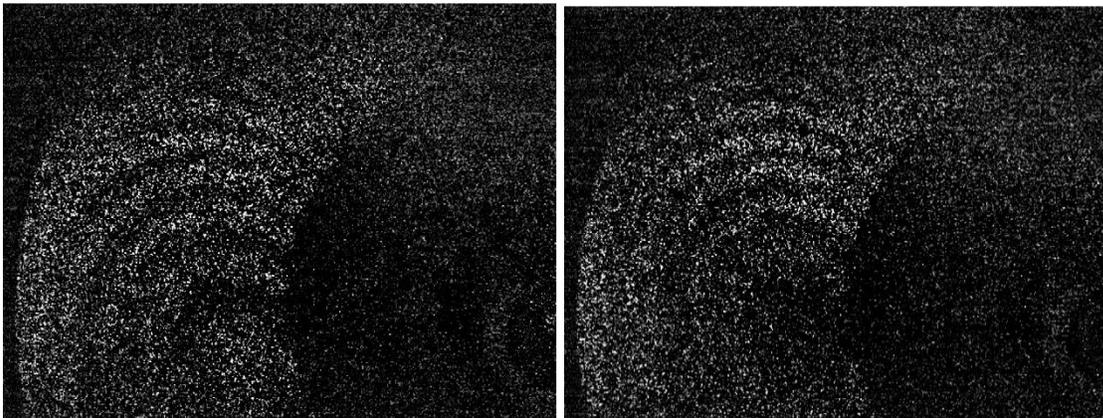
*Figura 39 Patrones de interferencia obtenidos a partir del arreglo de la figura 64. Desplazamientos en el eje z de 0.3 y 0.4  $\mu\text{m}$  respectivamente.*

En estas series de imágenes se hace más evidente el anillo que se forma al sustraer las dos imágenes.

Para los desplazamientos en x.



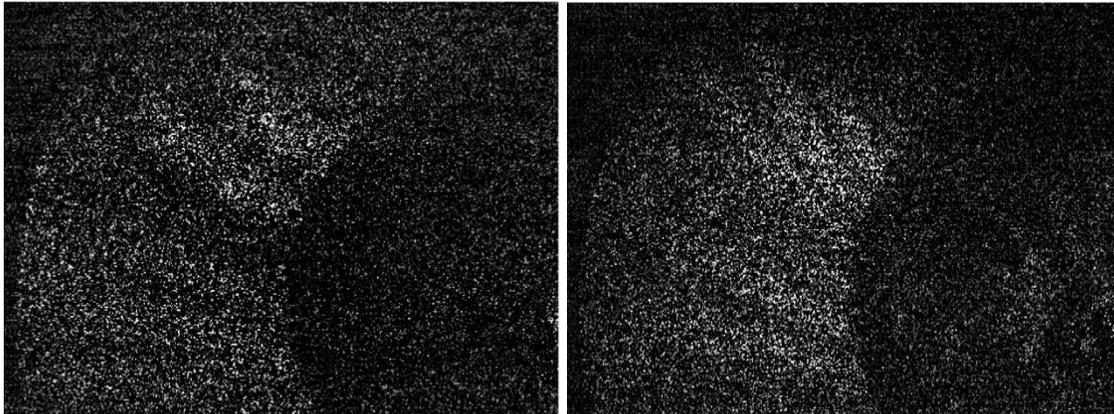
*Figura 40 Patrones de interferencia obtenidos a partir del arreglo de la figura 36. Desplazamientos en el eje x de 0.1 y 0.2  $\mu\text{m}$  respectivamente.*



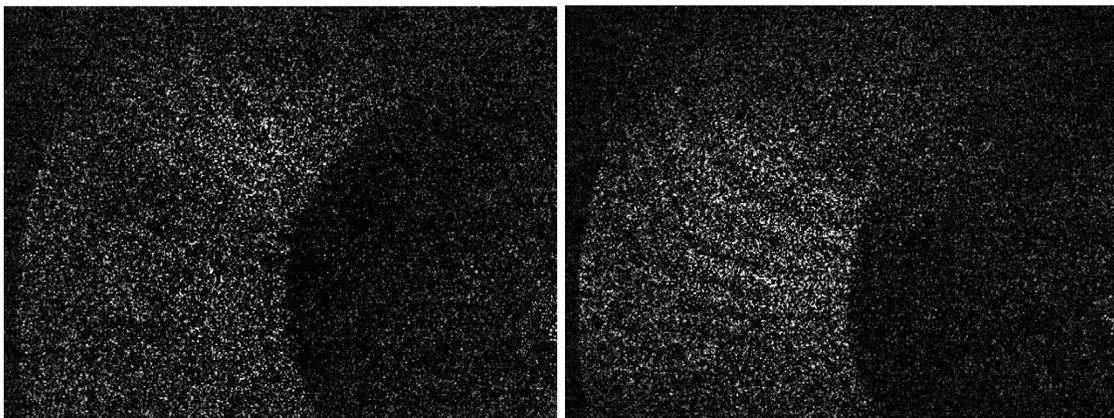
*Figura 41 Patrones de interferencia obtenidos a partir del arreglo de la figura 36. Desplazamientos en el eje x de 0.3 y 0.4  $\mu\text{m}$  respectivamente.*

Podemos observar cómo se forman anillos por el movimiento en x del interferómetro de la figura 36.

Para los desplazamientos en y.



*Figura 42 Patrones de interferencia obtenidos a partir del arreglo de la figura 36. Desplazamientos en el eje y de 0.1 y 0.2  $\mu\text{m}$  respectivamente.*



*Figura 43 Patrones de interferencia obtenidos a partir del arreglo de la figura 36. Desplazamientos en el eje y de 0.3 y 0.4  $\mu\text{m}$  respectivamente.*

Para la diferencia de camino geométrico de esta reconfiguración tenemos:

$$|GPL_{ref} - GPL_{obj}| = 0 \text{ cm}$$

## Capítulo VI. Conclusiones.

---

En cuanto al primer punto de objetivos específicos, se probaron dos arreglos ópticos para generar patrones de interferencia con dos espejos panorámicos tomando como referencia el interferómetro de la figura 15 [1]. El primero (figura 16) es idéntico al interferómetro propuesto y probado en [1] salvo por el uso de dos filtros neutros de densidad variable y un diafragma. Con este, se obtuvieron patrones de interferencia que se muestran en la figura 19 para desplazamientos en el eje Z, figura 20 y 21 para desplazamientos en el eje X y figura 22 para desplazamientos en el eje Y. En la figura 18 se muestra la imagen de referencia que nos sirve para aplicar el método de sustracción fotográfica con lo que se obtienen los distintos correlogramas en las tomas subsecuentes. Los patrones de interferencia muestran bajo contraste, esto se debe a varios factores, entre ellos: la diferencia de camino óptico entre los haces de referencia y objeto, por otro lado, también comprobé que la diferencia de intensidades entre los haces interferentes es uno de estos factores importantes para conseguir un buen contraste de franjas.

En la figura 23, se muestra mi propuesta de configuración para el mismo interferómetro de la figura 15. En este caso se adiciona otro filtro neutro de densidad variable y dos polarizadores. Los resultados obtenidos con esta adición de elementos se muestran en las figuras 26 y 27 para el desplazamiento en el eje Z; figuras 28 y 29 para los desplazamientos en el eje X y figuras 30 y 31 para los desplazamientos en el eje Y. Los elementos ópticos sumados a este arreglo me permitieron obtener una mejoría considerable en el contraste de las franjas. En las figuras antes citadas se ve con mejor detalle los patrones de interferencias que generan los distintos desplazamientos en cada eje coordenado. En cada una de las imágenes se ve un contorno rectangular, dicho contorno se colocó para darnos una idea de la zona de localización de las franjas al momento de aplicar el método de sustracción. Los tres filtros neutros de densidad variable me permitieron igualar las intensidades de ambos haces (referencia y objeto). Al implementar estos elementos al arreglo original es que concluí que es importante el hacer que las intensidades de ambos haces sea lo más parecida posible. En mi caso, esa intensidad se veía reflejada en el software por medio del cual se obtuvieron las imágenes y que es propio de la cámara con

la que las mismas se tomaron. Dicho software permite graficar las intensidades horizontales y verticales recibidas por el sensor, es decir, permite hacer una medición a lo largo de una línea horizontal, en un primer gráfico, y vertical en un segundo gráfico. Esta grafica está en rangos de 0 a 255 en el eje “y” y a lo largo del tamaño de la imagen, es decir, el número del pixel en el eje “x”.

El hecho de armar estos dos arreglos opto-electrónicos tiene dos finalidades: en primer lugar, validar que los elementos utilizados para generar los desplazamientos nos permitirían llegar a los resultados obtenidos en el arreglo original [1], ya que en dicho arreglo los desplazamientos se hicieron con piezoeléctricos, por lo tanto, los movimientos están mucho más controlados. En nuestro caso se utilizaron tornillos micrométrico manuales. Entonces, era de vital importancia verificar que el sistema para hacer los desplazamientos sería válido. En segundo lugar, y consideramos de mayor importancia, el obtener franjas de interferencia en estos dos arreglos nos permitió partir de resultados comprobados por el autor de esta tesis para tener una base de comparación con los interferogramas obtenidos por nuestras dos reconfiguraciones propuestas.

Con respecto al punto dos de los objetivos específicos, considero que se mejoraron las expectativas, ya que no solo se obtuvieron franjas de interferencia en dos ejes (X y Z), también se lograron en el eje Y. Cosa que en el arreglo de partida [1] no se lograron capturar.

La parte medular de esta tesis, y la que se consideró la hipótesis de la misma es: si era posible el conseguir resultados parecidos al arreglo original de dos espejos utilizando solo uno de los espejos. Considero que se obtuvieron buenos resultados al lograr correlogramas en los tres ejes de desplazamiento.

El arreglo de la figura 32 nos debe recordar un interferómetro de Michelson o de Twyman-Green. Es un arreglo que, en comparación con los anteriores, tiene menos elementos ópticos. Pero no demerita los resultados obtenidos con él. Este arreglo nos mostró que en ocasiones se pueden lograr resultados similares con menos complejidad. Consideramos que se debe trabajar más con él; se requiere buscar un método para controlar la intensidad del haz de referencia, ya que llega a la cámara con mucha diferencia de intensidad con respecto al del haz objeto. Aunado a esto, se debe trabajar con optimizar las longitudes de

camino óptico. Creo que estos elementos nos permitirán, en un futuro, obtener patrones de interferencia de mejor contraste. Por otro lado, al reducir la cantidad de elementos ópticos y los caminos ópticos, también permitirían reducir el tamaño del interferómetro.

El arreglo de la figura 36 muestra mi solución personal a la hipótesis planteada en el párrafo cinco de este capítulo. Dicho arreglo también nos permitió obtener patrones de interferencia con un solo espejo en los tres ejes de desplazamiento. Todavía no se tienen patrones de interferencia de campo completo. Pero esto es debido a la potencia de nuestra fuente de luz. El hecho de que el haz de referencia esté separado nos permitió controlar la intensidad del mismo, con lo que fue posible mejorar el contraste de las franjas de interferencia. Creo cabalmente que este arreglo puede dar mejores resultados con el uso de una fuente de luz de mayor potencia. Esto permitiría correlogramas más claros y de campo completo. Tal cosa ayudaría en el proceso siguiente de obtener el mapa de fase de los correlogramas resultantes, dado que partiríamos de correlogramas de mejor calidad.

Los resultados obtenidos en los 4 arreglos mostrados en el capítulo tres son prueba fehaciente de la factibilidad de usar sistemas panorámicos para generar patrones de interferencia de moteado. Esto, claro, con sus reservas en cuanto al tipo de fuentes de iluminación utilizadas. Ya que en estos arreglos se utilizó una fuente de luz altamente coherente.

## Trabajos a futuro.

---

Se presentan varias oportunidades de mejora a las dos reconfiguraciones mostradas en el capítulo tres.

- Mejorar el sistema de desplazamientos para permitir que los mismos sean controlados por una fuente de poder y piezoeléctricos.
- Para la primera reconfiguración:
  - Encontrar franjas de correlación en los dos ejes faltantes.
  - Mejorar las longitudes de camino geométrico.
  - Buscar una solución para controlar la intensidad del haz de referencia.
  - Buscar una solución para evitar los reflejos del cubo divisor.
- Utilizar una fuente de luz con más potencia para generar interferogramas de campo completo.
- Calcular las longitudes de caminos ópticos para ambas reconfiguraciones, dado que lo calculado hasta el día de hoy son caminos geométricos, o bien, trayectorias geométricas.
- Caracterizar los interferómetros.
- Encontrar una configuración para reemplazar los brazos del interferómetro de la segunda reconfiguración por fibras ópticas.
- Trabajar con objetos de estudio con geometrías distintas al cilíndrico.
- Aplicar un algoritmo de desenvolvimiento de fase a los correlogramas obtenidos.
- Elaborar el modelo matemático para el interferómetro panorámico de moteado original [1].
- Buscar configuraciones que permitan miniaturizar ambos arreglos propuestos en esta tesis.

## Referencias.

---

[1] Araceli Soto, Juan B. Hurtado-Ramos, Liliana Reséndiz, y J. Joel González-Barbosa. “An ESPI technique base on panoramic interferometry with paraboloid mirrors”. Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada. Querétaro, Querétaro, México. 2008.

[2] Jean-François Vandenrijt, Cédric Thizy, Igor Alexeenko, Giancarlo Pedrini, Jonathan Rochet, Birgit Vollheim, Iagoba Jorge, Pablo Venegas, Ion López, Wolfgang Osten, Marc P. Georges. Mobile speckle interferometer in the long-wave infrared for aeronautical nondestructive testing in field conditions.

[3] Guangkai Sun,\* Zhenggan Zhou, Xiucheng Chen, and Jie Wang. Ultrasonic characterization of delamination in aeronautical composites using noncontact laser generation and detection. Institute for NDT and Mechatronics Engineering, Beihang University, 37 Xueyuan Lu, Haidian District, Beijing 100191, China

[4] Jean-François Vandenrijt , Cédric Thizy, Fabian Languy and Marc Georges. Digital Holographic Interferometry in the Long-Wave Infrared Range for Measuring Large Deformations of Space Components under Thermal-Vacuum Testing. 9 July 2018E

[5] Igor Alexeenko, Jean-François Vandenrijt, Marc Georges ,Giancarlo Pedrini, Thizy Cédric, Wolfgang Osten, Birgit Vollheim. Digital holographic interferometry by using long wave infrared radiation (CO2 laser).

[6] Venancio Martínez-García, Martin Wenzelburger, Andreas Killinger, Giancarlo Pedrini, Rainer Gadow and Wolfgang Osten. Residual Stress Measurement with Laser-Optical and Mechanical Methods

[7] Pedro J. Sousa, Fernando Carneiro, Nuno Viriato Ramos, Francisco Barros, Mário A. P. Vaza, Paulo J. Tavares, Pedro M. G. P. Moreira. Application of 3D electronic speckle pattern interferometry for the analysis of thermal response in printed circuit boards.

## Referencias.

---

- [8] Sara B. Fair, John A. Gilbert, Donald R. Matthys and Christelle H. Lindner. "Development of a phase-displacement equation por panoramic interferometry". *Applied optics* 1 july 2000 / vol. 39, No. 19.
- [9] Interferometry. Parameswaran Hariharan. School of Physics, University of Sydney, Australia. Katherine Creath Optineering, Tucson, Arizona, USA.
- [10] Pradmod K. Rastogi , "Digital Speckle Pattern Interferometry and Ralated Techniques", Wiley
- [11] Born, M., Wolf, E. (1999), *Principles of Optics*. Cambridge: Cambridge University Press.
- [12] Crane, R. "Interference phase measurement" (1969), *Appl. Opt.* 8, 538–542.
- [13] Matsumoto, H. (1986), *Appl. Opt.* 25, 493–498.
- [14] Kubota, T., Nara, M., Yoshino, T. (1987), *Opt. Lett.* 12, 310–312.
- [15] Offner, A., Malacara, D. (1992), in D. Malacara (Ed.), *Optical Shop Testing*. New York: John Wiley, pp. 427–454.
- [16] Loomis, J. S. (1980), *Opt. Eng.* 19(5), 679–685.
- [17] Creath, K., Wyant, J. C. (1992), in D. Malacara (Ed.), *Optical Shop Testing*, (2nd ed.), New York: John Wiley & ons, pp. 599–652.
- [18] Mantravadi, M. V. (1992b), in D. Malacara (Ed.), *Optical Shop Testing*. New York: John Wiley, pp. 123–172.
- [19] Malacara, D. (1992b), in D. Malacara (Ed.) *Optical Shop Testing*. New York: John Wiley, pp. 173–206.
- [20] Birch, K. G. (1973), *J. Phys. E: Sci. Instrum.* 6, 1045–1048.
- [21] Linnik, V. P. (1933), *C. R. Acad. Sci. URSS* 1, 18.

## Referencias.

---

[22] Francon, M., Mallick, S. (1971), Polarization Interferometers: Applications in Microscopy and Macroscopy. London: Wiley- Interscience.

[23] Ángel Manuel Fernández Doval, Tesis Doctoral. Una aproximación sistemática a la holografía-TV y desarrollo de nuevas técnicas para la cuantificación y el análisis de magnitudes dinámicas con periodicidad temporal, Vigo (1997), pp.5-70.

[24] Jorge Ramón Parra Michel, Tesis de Maestría. Interferometría Electrónica de moteado y desplazamiento de fase en eventos dinámicos para el análisis de la deformación uni-axial en probetas metálicas soldadas (2006), pp 1.

<https://cio.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1002/676/1/11508.pdf>

[25] Mathias Lehmann (2001), in Pradmod K. Rastogi , “Digital Speckle Pattern Interferometry and Related Techniques”, Wiley , pp 3.

[26] Industrial Applications of Speckle Techniques. Measurement of Deformation and Shape. Wei An. Royal Institute of Technology Department of Production Engineering Chair of Industrial Metrology & Optics 100 44 Stockholm, Sweden 2002

<https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:9132/FULLTEXT01.pdf>