



Informe técnico

Construcción de un interferómetro de Fizeau para pruebas ópticas

Pedro Cebrian Xochihuila
Neil Charles Bruce Davidson
Martha Rosete Aguilar
Carlos Jesús Román Moreno

30 de noviembre del 2023

Proyecto interno

Construcción de un interferómetro de Fizeau para pruebas ópticas

Pedro Cebrian Xochihuila, Neil C. Bruce Davidson, Martha Rosete Aguilar,
Carlos Jesús Román Moreno.

Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología (ICAT-UNAM), Departamento
de Óptica, Microondas y Acústica, Instrumentación óptica.

Resumen

En este trabajo se describen las componentes ópticas que se utilizan para la construcción de un interferómetro de Fizeau que será utilizado para evaluar las superficies ópticas que se fabrican en el Laboratorio Universitario de Fabricación de Equipos Ópticos (LUFABEO) del ICAT. Para determinar la precisión del interferómetro, se prueba una superficie plana de la cual se obtiene un patrón de franjas brillantes y oscuras llamado interferograma y mediante el análisis de este interferograma se obtienen las aberraciones presentes en la superficie bajo prueba, posteriormente, la misma superficie plana es probada con otro interferómetro de Fizeau de marca comercial Zygo.

Como resultado de esta comparación se encontró que el interferómetro construido en el laboratorio permite medir deformaciones del orden de unos sesenta nanómetros, mientras que con el interferómetro comercial se pueden medir deformaciones de hasta unos treinta nanómetros aproximadamente, sin embargo, la precisión del interferómetro construido es suficiente para probar superficies de muy buena calidad óptica que pueden ser empleadas en proyectos de investigación, desarrollo tecnológico y docencia.

Índice

Nomenclatura

Introducción

1	Funcionamiento del interferómetro de Fizeau.....	6
1.1	Sistema de filtraje espacial de luz.....	6
1.2	Divisor de haz de luz.....	7
1.3	Sistema de colimación.....	8
1.4	Sistema de referencia.....	8
1.5	Sistema de prueba.....	8
1.6	Plano de detección.....	9
2	Construcción del interferómetro.....	9
2.1	Mesa óptica.....	10
2.2	Sistema de filtraje espacial.....	10
2.2.1	Fuente de iluminación.....	11
2.2.2	Apertura numérica del objetivo de microscopio.....	11
2.2.3	Tamaño del pinhole.....	13
2.3	Divisor de Haz.....	13
2.4	Lente colimadora.....	13
2.5	Plano de referencia.....	14
2.6	Superficie de prueba.....	14

3	Resultados experimentales.....	15
3.1	Algoritmo SSPCA-PSI.....	16
3.2	Software Fringe XP.....	18
3.3	Software Durango.....	19
3.4	Evaluación con un interferómetro de Fizeau comercial.....	20
4	Discusión.....	21
	Conclusiones.....	21
	Agradecimientos.....	23
	Referencias Bibliográficas.....	23

Nomenclatura

<i>Símbolo</i>	<i>Significado</i>
<i>He-Ne</i>	<i>Helio-Neón</i>
<i>in</i>	<i>Pulgadas</i>
<i>mm</i>	<i>Milímetros</i>
<i>NA</i>	<i>Apertura Numérica</i>
<i>nm</i>	<i>Nanómetros</i>
<i>P-V</i>	<i>Error Pico-Valle</i>
<i>RMS</i>	<i>Error Cuadrático Medio</i>
λ	<i>Lambda en nanómetros</i>
μm	<i>Micrómetros</i>

Introducción.

Al finalizar el proceso de fabricación de las componentes ópticas, es necesario hacer una evaluación de la calidad óptica para determinar si la superficie fabricada cumple con los parámetros requeridos, o bien, se debe continuar con el proceso de pulido hasta alcanzar la calidad deseada. Para realizar esta tarea, se pueden utilizar pruebas geométricas tales como la prueba de la Navaja (Ojeda-Castañeda, 2007), la prueba de Ronchi (Cornejo-Rodríguez, 2007), etc., o bien, pruebas interferométricas, tales como el interferómetro de Newton, el interferómetro de Fizeau (Mantravadi y Malacara, 2007), etc., siendo estas últimas de mayor precisión ya que a través del análisis de los interferogramas se pueden medir deformaciones del orden de unas decenas de nanómetros sobre la superficie fabricada.

Comúnmente en los talleres de fabricación de componentes ópticas se emplean con frecuencia el interferómetro de Newton y el de Fizeau, en ambos instrumentos se necesita una superficie de referencia (superficie patrón) con la cual será comparada la superficie de prueba (superficie fabricada), la principal diferencia entre estos dos interferómetros, es que en el de Newton la superficie de referencia y la de prueba deben estar en contacto directo, lo cual expone a posibles rayaduras en las superficies si no se tienen el debido cuidado, sin embargo, en el interferómetro de Fizeau las superficies no están en contacto directo lo cual representa una ventaja con relación al de Newton.

1 Funcionamiento del interferómetro de Fizeau

El interferómetro de Fizeau está compuesto por los siguientes elementos: sistema de filtraje espacial de luz, divisor de haz de luz, sistema de colimación, sistema de referencia, sistema de prueba y un plano de detección tal como se muestra en la figura 1 y que a continuación se describen.

1.1 Sistema de filtraje espacial de luz

Este sistema tiene como función eliminar las fluctuaciones de intensidad del haz de luz láser, a este fenómeno también se le conoce como ruido óptico (<https://www.newport.com/n/spatial-filters>). El sistema de filtraje espacial está compuesto por un láser de He-Ne con una longitud de onda $\lambda = 632.28 \text{ nm}$, posteriormente se coloca

un *Objetivo de microscopio* con el fin de concentrar todos los rayos de luz provenientes del láser a un punto (fuente puntual), justo en el plano donde todos los rayos convergen a un punto, se coloca un *Pinhole* (placa metálica con un micro orificio) para eliminar el ruido óptico y solo dejar pasar los rayos que pertenecen al máximo central tal como se muestra en la figura 2.

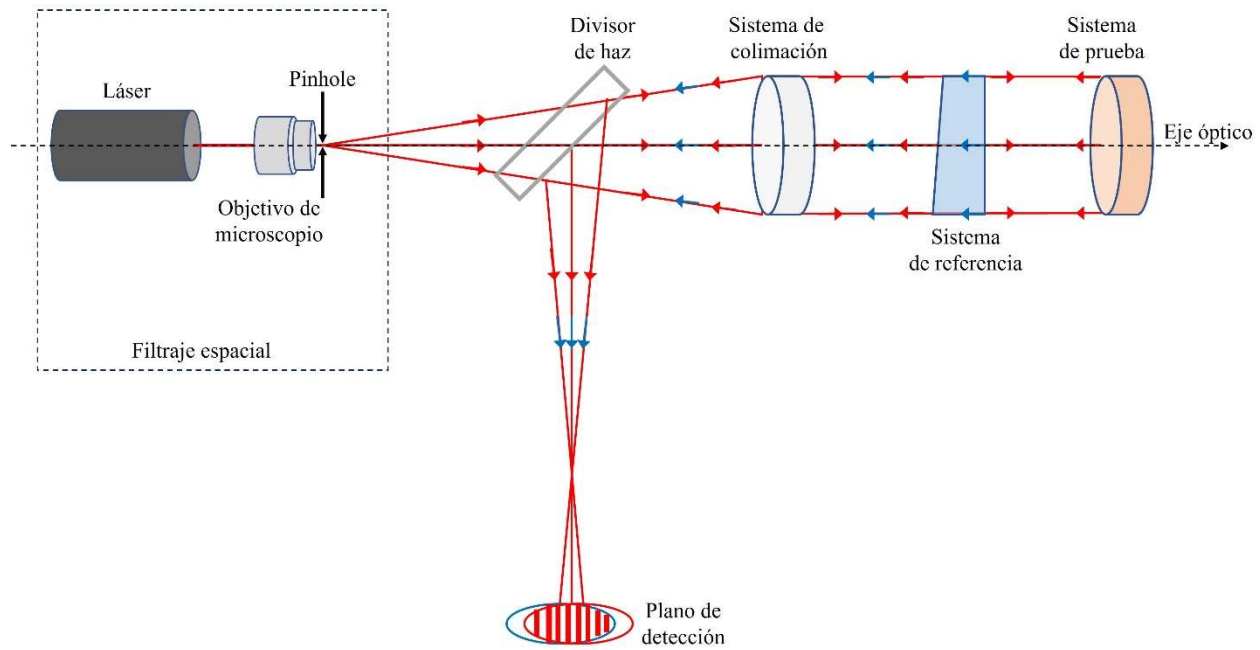


Figura 1. Esquema del interferómetro de Fizeau. Fuente: elaboración propia.

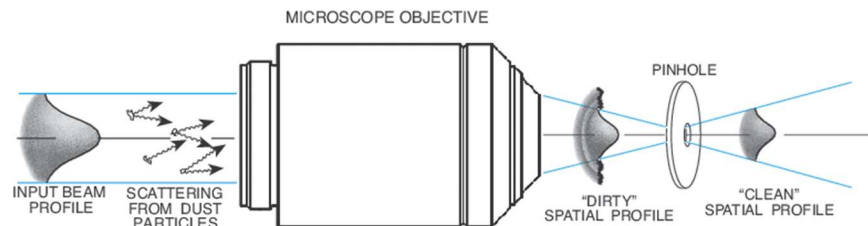


Figura 2. Esquema del filtraje espacial de la luz (<https://www.newport.com/n/spatial-filters>)

1.2 Divisor de haz de luz.

Este elemento se coloca después del sistema de filtraje espacial a un ángulo de 45° grados respecto al eje óptico, su función es desviar a 90° los rayos de luz (o frentes de

onda) que serán reflejados por el sistema de referencia y el sistema de prueba para que finalmente lleguen plano de detección y se superpongan (Figura 1).

1.3 Sistema de colimación

Se trata de una lente convergente tipo doblete acromático que se coloca después del *Pinhole* de tal manera que su distancia focal f coincida con la posición del *Pinhole*. Esta lente tiene como función cambiar la dirección de los rayos divergentes (frentes de onda esférica que emergen del *Pinhole*) a rayos paralelos entre sí (frentes de onda plana) después de atravesar dicha lente, es decir, se tiene un haz de luz colimado (ver figura 1).

1.4 Sistema de referencia.

Se trata de una superficie plana de alta calidad óptica, es decir, las deformaciones que tiene en su superficie pueden ser de unas decenas de nanómetros, es decir, de $\lambda/10$ o incluso ser más pequeñas, donde λ corresponde a la longitud de onda de la fuente de luz (para el láser de He-Ne es de 632.28 nm). Este elemento óptico refleja los rayos, o bien, el frente de onda que será el de referencia debido a que sus deformaciones son tan pequeñas, el frente de onda regresa pasando nuevamente por el *Sistema de colimación* hasta llegar al divisor de haz donde es desviado a 90 grados para llegar finalmente al plano de detección.

1.5 Sistema de prueba.

Este elemento se coloca después del sistema de referencia, parte del haz de luz que pasa a través del sistema de referencia llega hasta la superficie de prueba y es reflejado llevando información de la forma de la superficie, al llegar al divisor de haz también es reflejado a 90° para finalmente llegar a la pantalla de observación y superponerse con los frentes de onda de referencia. La superposición del frente de onda de referencia con el frente de onda de prueba da como resultado una distribución de franjas brillantes y oscuras alternadas conocido como interferograma o patrón de interferencia del cual puede extraerse información cualitativa y cuantitativa del sistema de prueba.

1.6 Plano de detección.

Para observar las franjas de interferencia a simple vista, se puede utilizar como plano de detección una simple hoja de papel bond, o de cualquier otro material que sea de color claro. Comúnmente se utiliza una cámara para capturar los interferogramas y posteriormente procesarlos en una computadora. Mediante un análisis cuantitativo de la forma de las franjas se obtienen las deformaciones del sistema bajo prueba y finalmente se puede hacer la reconstrucción tridimensional de la forma de la superficie.

Si la superficie de prueba es muy semejante a la superficie de referencia, las franjas de interferencia tienden a ser rectas, paralelas entre sí y de igual espesor tal como se muestra en la figura 3. Cualquier otra forma de las franjas indica que la superficie bajo prueba presenta deformaciones que comúnmente se les conoce como aberraciones. Esta es una prueba rápida que a simple vista permite obtener información cualitativa de la superficie fabricada.

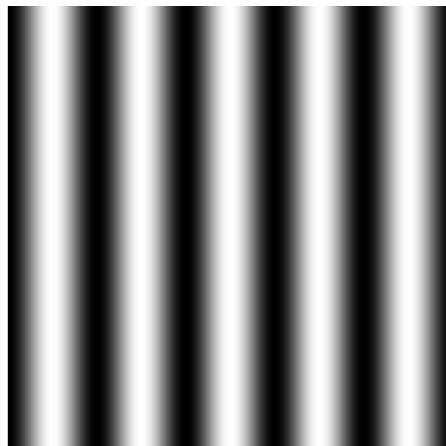


Figura 3. Franjas de interferencia para una superficie de prueba muy semejante a la de referencia. Fuente: elaboración propia, simulación con MATLAB.

2 Construcción del interferómetro

Para construir el interferómetro es necesario contar con una mesa óptica, es decir, una mesa con un sistema que amortigüe las vibraciones mecánicas con el fin de dar estabilidad al funcionamiento del interferómetro y que las mediciones realizadas con este instrumento sean confiables.

Todas las componentes ópticas que constituyen el interferómetro deberán colocarse de tal manera que estas queden alineadas con eje óptico cuidando siempre de no cambiar la altura y la dirección del haz de luz.

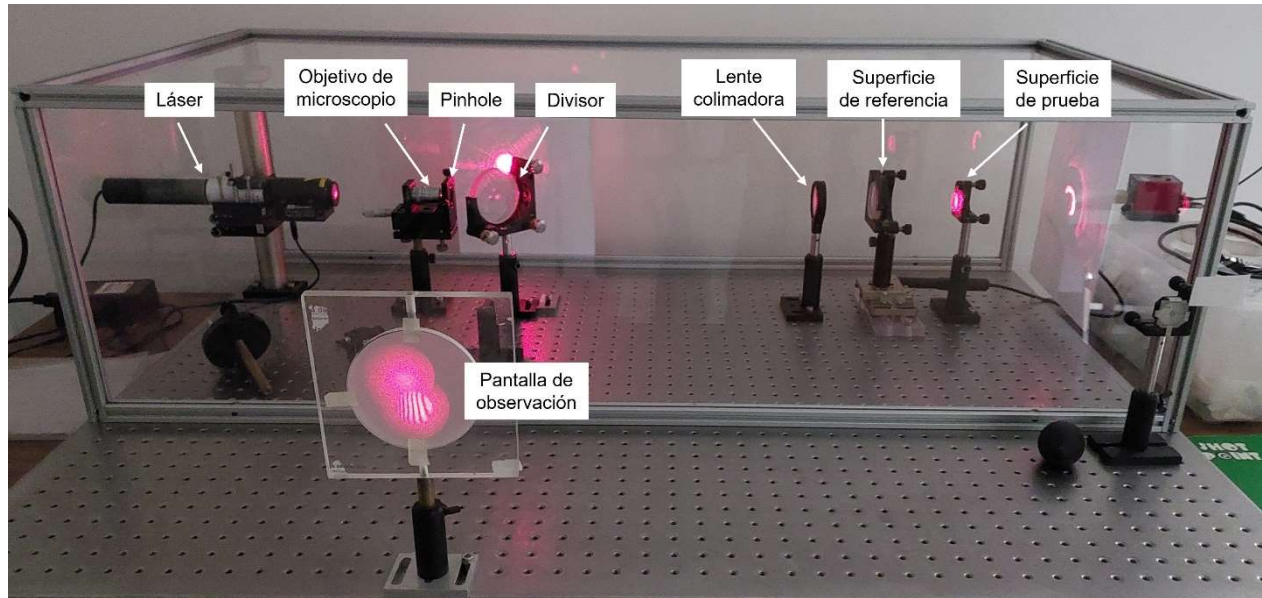


Figura 4. Arreglo experimental del interferómetro de Fizeau. Fuente: elaboración propia.

2.1 Mesa óptica.

Para el montaje de las componentes ópticas, se utilizó una mesa óptica de marca comercial TMC, modelo 75SSC-135-12 que tiene dimensiones de 900x1200 mm y tiene una distribución de orificios igualmente espaciados a 25 mm que sirven para fijar las monturas de los elementos ópticos mediante tornillos (Figura 5).

2.2 Sistema de filtraje espacial

Como se mencionó anteriormente, este sistema está constituido por la fuente de luz láser, el objetivo de microscopio y el pinhole o micro orificio. Su principal función de este sistema es eliminar las fluctuaciones de intensidad (ruido óptico) que podría afectar los resultados obtenidos al probar cualquier superficie. Cada uno de los elementos que integran este sistema se describen a continuación.



Figura 5. Mesa óptica de marca comercial TMC

(<https://configure.techmfg.com/ecatalog/catalog/Optical%20Tops%20and%20Breadboards/75SSC-135-12>).

2.2.1 Fuente de iluminación

Como fuente de iluminación, se utiliza un láser de Helio-Neón de marca comercial *Melles Griot* modelo 25-STP-912-249 que tiene una longitud de onda $\lambda = 632.28$ nm. La principal ventaja de utilizar un láser como fuente, es que se tiene luz monocromática, misma que es indispensable para conseguir el fenómeno de interferencia (patrón de franjas brillantes y oscuras).

2.2.2 Apertura numérica del objetivo de microscopio

Para determinar la apertura numérica (NA) del objetivo de microscopio, es necesario conocer la longitud focal f y el diámetro D de la lente que será utilizada para colimar el haz de luz. Por definición se tiene que la NA es

$$NA = n \sin \theta, \quad (1)$$

donde n es el índice de refracción y θ es el ángulo del semi-cono de rayos de luz que emerge del objetivo de microscopio tal como se muestra en la figura 6.

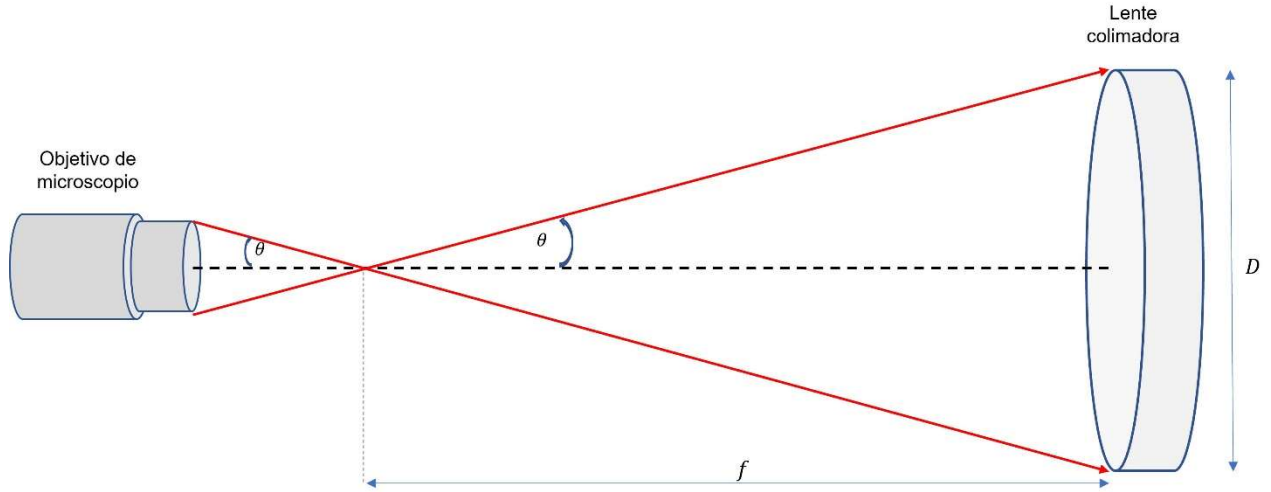


Figura 6. Esquema para determinar la apertura numérica NA del objetivo de microscopio en función la longitud focal f y el diámetro D de la lente colimadora.

Fuente: elaboración propia.

Considerando f y D de la lente, se tiene que

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{D/2}{f} \right), \quad (2)$$

entonces, reescribiendo la ecu. (1) se tiene finalmente que

$$NA = n \sin \left[\tan^{-1} \left(\frac{D/2}{f} \right) \right]. \quad (3)$$

Tomando en cuenta que el índice de refracción del aire es $n = 1$, y que se utilizará una lente colimadora con un diámetro $D = 50.8$ mm y una longitud focal $f = 500$ mm, entonces de la ecu.(3), se tiene que la apertura numérica del objetivo de microscopio es $NA = 0.050$, este valor es el mínimo necesario para garantizar que el objetivo de microscopio iluminará completamente la superficie de la lente colimadora.

En el laboratorio se cuenta con un objetivo de microscopio de marca comercial Edmund modelo DIN 20 con una $NA = 0.40$, de acuerdo con la ecu.(1), el cono de luz de este

objetivo de microscopio se abrirá más rápidamente, pero puede utilizarse sin ningún problema, ya que se logra una iluminación completa de la lente colimadora.

2.2.3 Tamaño del pinhole

El diámetro optimo d_{opt} del pinhole estará determinado por la siguiente ecuación

$$d_{opt} = \frac{F\lambda}{a}, \quad (4)$$

donde F es la longitud focal de la lente del objetivo, λ la longitud de onda del láser y a es el radio del haz de luz del láser. Esta ecuación garantiza que pasará el 99.3% de la energía total del haz (<https://www.newport.com/n/spatial-filters>).

2.3 Divisor de haz

Se utilizó un divisor de haz de marca Newport modelo 30Q40BS.1 diseñado para trabajar en la región del visible con diámetro de 76.2 mm y reflectancia del 50%, este elemento se coloca entre el pinhole y la lente colimadora formando un ángulo de 45° con eje óptico para desviar a 90° los frentes de onda de referencia y de prueba que llegan de regreso al divisor y se reflejan para llegar a la pantalla de observación y superponerse (Figura 4).

2.4 Lente colimadora

Se utilizó una lente tipo doblete acromático de marca comercial Newport modelo PAC091AR.14 que tiene una calidad óptica de $\lambda/4$ donde $\lambda = 632.8$ nm, tiene un diámetro de 50.8 mm y una Longitud Focal Efectiva (LFE) de 500 mm, este doblete está diseñado para trabajar en el rango del visible de manera que permite utilizar cualquier fuente de luz e incluso luz blanca. Esta superficie óptica se coloca de tal manera que la fuente puntual (Pinhole) quede justamente a la distancia focal de la lente, de esta manera se consigue que los rayos de luz sean paralelos entre sí, es decir, un haz colimado o frentes de onda plana después de atravesar esta lente.

2.5 Plano de referencia

Se trata de una superficie plana de marca comercial Newport modelo 20QB20, de acuerdo con el fabricante tiene una calidad óptica de $\lambda/10$ considerando $\lambda = 632.8$ nm, es decir, las deformaciones presentes en esta superficie tienen como valor máximo 63 nm aproximadamente de acuerdo con el certificado proporcionado por el fabricante (Figura 7). También tiene un diámetro de 50.8 mm y se coloca después de la lente colimadora a cualquier distancia, en este caso se fijó a una distancia de 60 mm tomando en consideración las dimensiones de la mesa óptica y que todas las demás componentes puedan colocarse sobre la mesa. La función de esta superficie es generar el frente onda de referencia con el que va a ser comparado el frente de onda de prueba generado por la superficie de prueba.

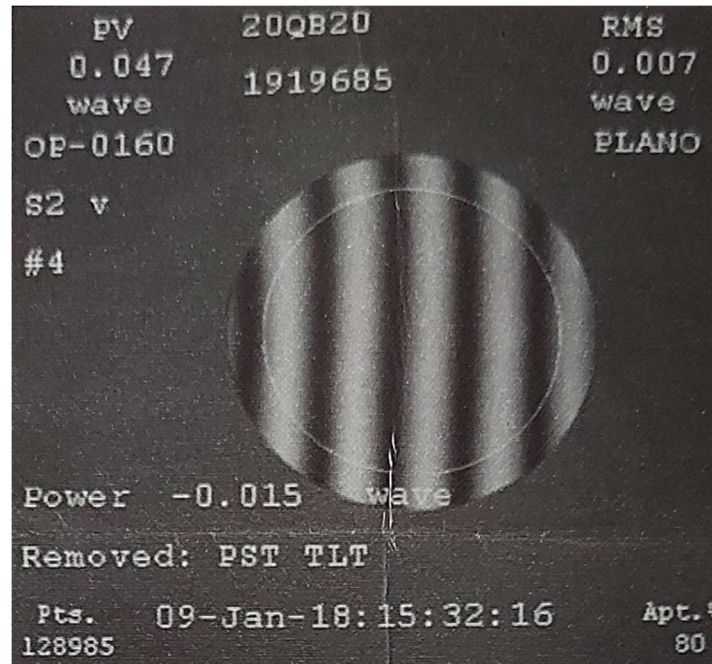


Figura 7. Certificado de la calidad óptica de la Superficie de referencia proporcionado por el fabricante. (<https://www.newport.com/p/20QB20>)

2.6 Superficie de prueba

Es una superficie plana de vidrio común de ventana y tiene un diámetro de una pulgada, sin embargo, el diámetro puede variar siempre y cuando no exceda los 50 mm correspondientes al diámetro de la superficie de referencia. La superficie de prueba se coloca después del plano de referencia a una distancia no mayor a 100 mm para evitar

que la intensidad del haz de luz disminuya desfavorablemente y ocasione baja visibilidad en las franjas del interferograma.

El análisis del patrón de franjas (Interferograma) proporcionará información cuantitativa de las deformaciones presentes en la superficie de prueba.



Figura 8. Superficie de prueba. Fuente: elaboración propia.

3 Resultados experimentales.

Una vez construido el interferómetro, la superficie de prueba es analizada, para realizar esta tarea la superficie se coloca a una distancia arbitraria de la superficie de referencia y se captura el interferograma, posteriormente la superficie es desplazada incrementando la distancia en intervalos de 10 micras para tres posiciones distintas y se capturan los interferogramas en cada caso, de esta manera se tiene una serie de cuatro interferogramas que se muestran en la primera columna de la figura 9(a). Para comprobar la repetitividad de los resultados, nuevamente se realiza el proceso de evaluación de la misma superficie bajo las mismas circunstancias y se capturan los interferogramas que se muestran en la segunda columna de la figura 9(b).

De manera cualitativa, cuando la superficie de prueba es muy semejante a la superficie de referencia, las franjas en los interferogramas tienden a ser rectas paralelas y de igual espesor. En la figura 9 puede observarse que las franjas de los interferogramas están lejos de ser rectas y paralelas, lo que indica que la superficie de prueba presenta deformaciones y están pueden corregirse dedicando más tiempo de pulido. Sin embargo, para obtener resultados cuantitativos de la superficie, se realiza el procesamiento de los

interferogramas utilizando diferentes softwares de análisis de franjas y estos son comparados entre sí para determinar si son congruentes.

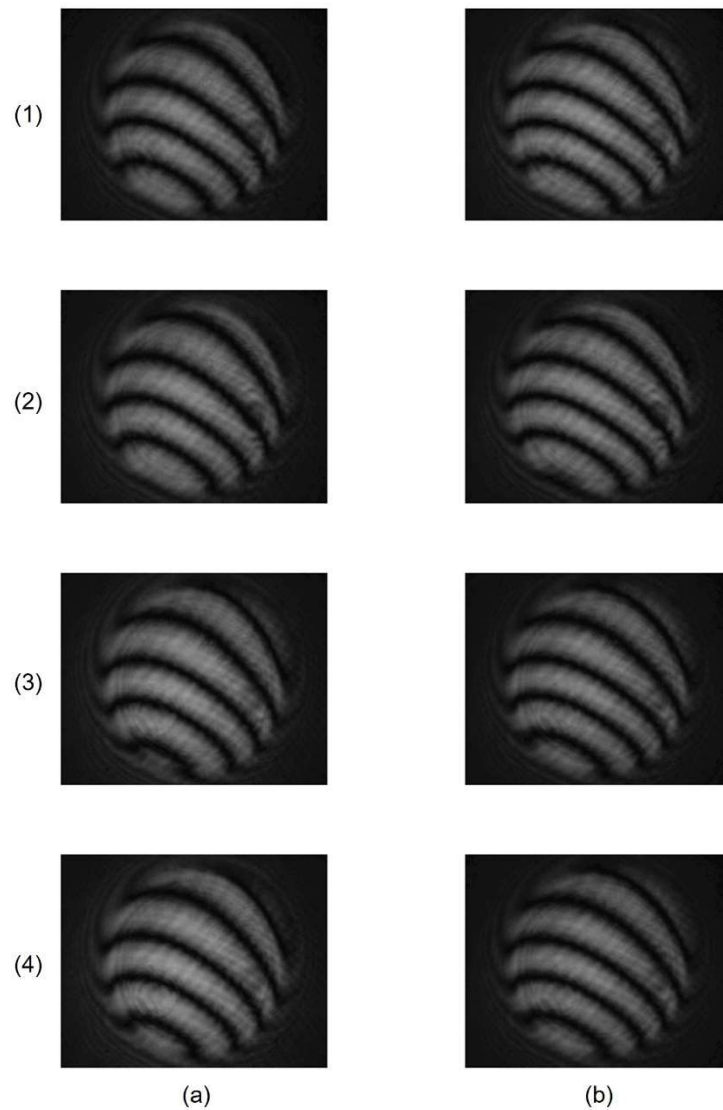


Figura 9. Se muestran dos series de 4 interferogramas experimentales obtenidos variando la distancia de separación entre la superficie de referencia y la superficie de prueba con un incremento de paso de 10 micras. (Ramírez, 2021)

3.1 Algoritmo SSPCA-PSI.

El algoritmo *Self-adaptive selection of interferogram subblocks and principal component analysis*, SSPCA (Moreno, 2021), se basa en la interferometría con desplazamiento de fase y a diferencia de otros métodos tiene la ventaja de eliminar el error de inclinación o “tilt” que podría introducirse al desplazar la superficie de prueba a diferentes posiciones para la toma de los interferogramas.

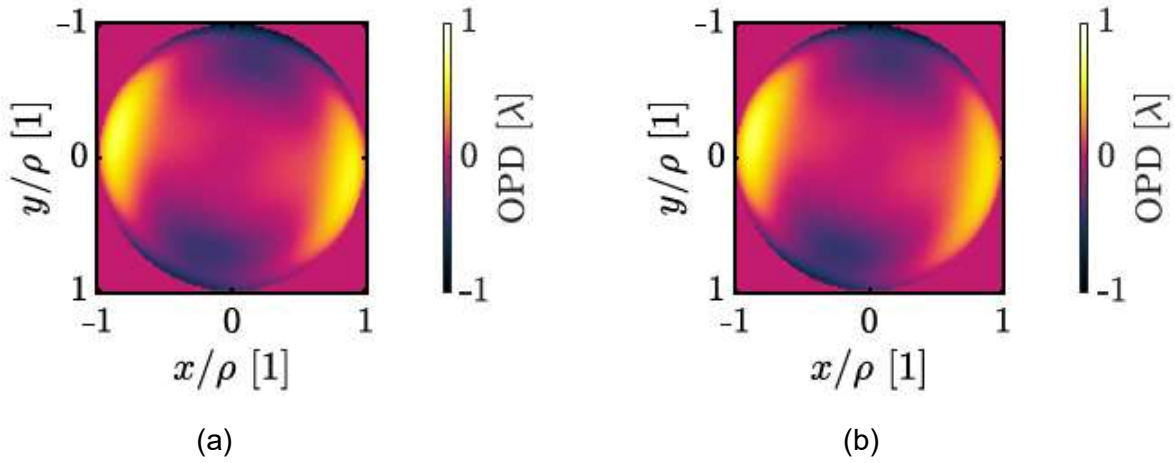


Figura 10. Mapa de alturas de la superficie reconstruida utilizando el método SSPCA-PSI. El color amarillo representa la altura máxima que se tiene en ciertas zonas de la superficie y en este caso corresponde a un nanómetro, por el contrario, las zonas oscuras representan los valles en la superficie y corresponden a menos un nanómetro, así el Pico-Valle es de dos nanómetros. (Moreno, 2021)

Después de procesar los interferogramas correspondientes a la serie (a) de la figura 9, el software SSPCA-PSI hace la reconstrucción de la forma de la superficie que se representa en el mapa de alturas que se muestra en la figura 10(a), donde se obtuvo un $RMS = 0.0164\lambda$. La altura máxima se representa en color amarillo y corresponde a una longitud de onda λ , y la parte más baja en la superficie está representada por la zona oscura y también corresponde a una longitud de onda λ , en resumen, la deformación de la superficie tiene un error *Pico-Valle* que corresponde a 2λ .

De igual manera se hace el mismo procedimiento para los interferogramas correspondientes a la serie (b) de la figura 9 y se obtuvo el mismo resultado, es decir, un $RMS = 0.0164\lambda$ y un $Pico-Valle = 0.0164\lambda$. Estos resultados muestran que hay repetibilidad en el procesamiento de los interferogramas de ambas series.

3.2 Software Fringe XP.

Este es un software libre disponible en internet para analizar interferogramas (<http://www.ceravolo.com/Fringe.html>, 1994), el programa solo necesita un interferograma y automáticamente hace el análisis de las franjas.

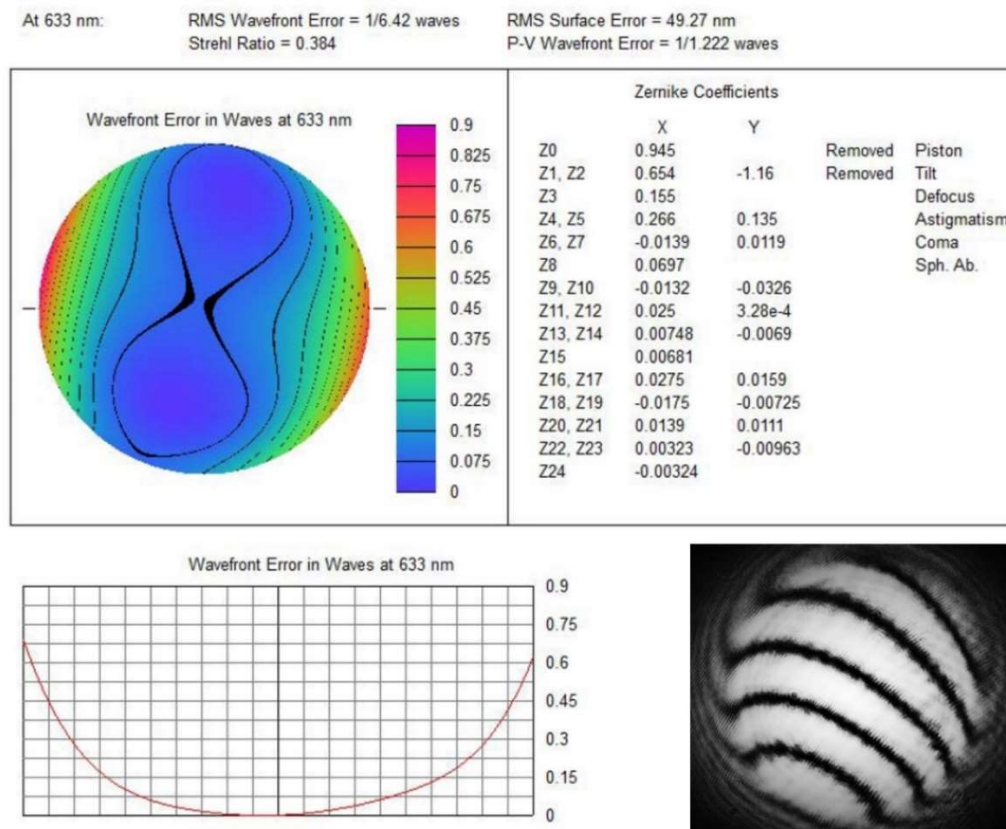


Figura 11. Resultado del análisis obtenido con el software Fringe XP de un interferograma, también se muestra el mapa de alturas de la superficie representada por diferentes colores. (<http://www.ceravolo.com/Fringe.html>).

y proporcionando algunos parámetros como la longitud de onda λ de la fuente de luz que se utilizó para obtener el interferograma, el diámetro de la superficie y su radio de curvatura, el software determina las aberraciones presentes en la superficie de prueba mediante un ajuste basado en los Polinomios de Zernike (Virendra y Mahajan, 2007).

Como resultado del análisis, el programa proporciona los coeficientes de los Polinomios de Zernike encontrados, además proporciona el mapa de alturas de la superficie (figura 11) y también se obtiene la reconstrucción tridimensional de la superficie evaluada. En la figura 11 puede observarse que la superficie tiene un RMS = 49.27 nm y un P-V = 1/1.22 nm.

3.3 Software Durango.

Es un software comercial de la empresa *Diffraction Internacional* para el análisis de franjas de interferencia (https://www.diffraction.com/durango_software.php), este programa también a partir de un interferograma determina las aberraciones presentes en la superficie mediante un ajuste de los Polinomios de Zernike. De igual manera, los datos que se le deben proporcionar son la longitud de onda, el diámetro de la superficie y el radio de curvatura.

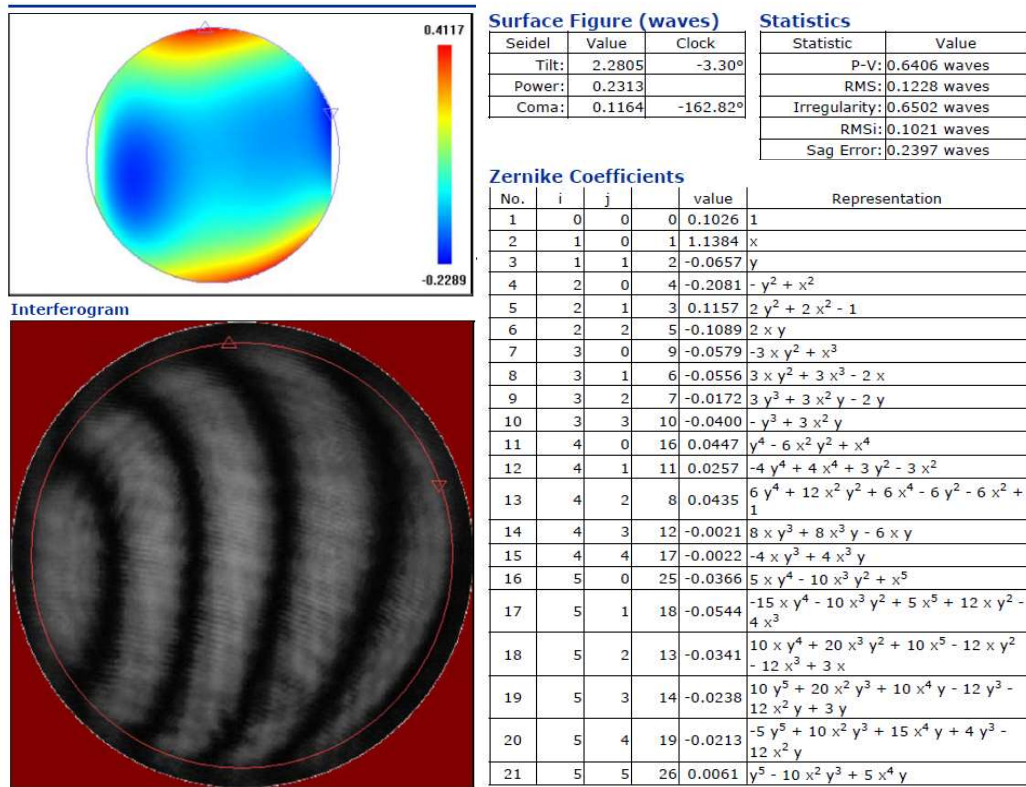


Figura 12. Evaluación del interferograma utilizando el software Durango. Se muestra el mapa de alturas sobre la superficie y los valores de las aberraciones presentes en la superficie de prueba. (https://www.diffraction.com/durango_software.php).

Esta evaluación fue realizada por el Dr. Rafael Izazaga Pérez jefe del taller de óptica del *Instituto Nacional de Astrofísica Óptica y Electrónica (INAOE)*, el taller cuenta con el *Software Durango* para evaluar toda óptica fabricada en dicho taller.

Como resultado de la evaluación se obtuvo un $RMS = 0.1228 \text{ nm}$ y un $P-V = 0.6406 \text{ nm}$ como se muestra en la figura 12.

3.4 Evaluación con un interferómetro de Fizeau comercial.

Esta tarea se llevó a cabo en el laboratorio de pruebas ópticas del *Instituto de Astronomía* de la UNAM con el apoyo del Dr. Salvador Cuevas Cardona responsable del laboratorio, el instituto cuenta con un Interferómetro de Fizeau de marca comercial Zygo (<https://www.zygo.com/products/metrology-systems/laser-interferometers>), este instrumento tiene una superficie plana de referencia con una calidad óptica de $\lambda/20$, la superficie de prueba se coloca alineada al eje óptico del interferómetro y en automático se hace la evaluación de la superficie.

Este software primero obtiene el interferograma, posteriormente encuentra la forma de las franjas y hace un ajuste mediante los polinomios de Zernike, en la figura 13 se puede ver el resumen de la evaluación, al igual que los demás programas muestra el mapa de altura y adicionalmente muestra la reconstrucción de la forma de la superficie en tres dimensiones. Como resultado de este análisis se obtuvo un $RMS = 0.098 \text{ nm}$ y un $P-V = 0.488 \text{ nm}$.

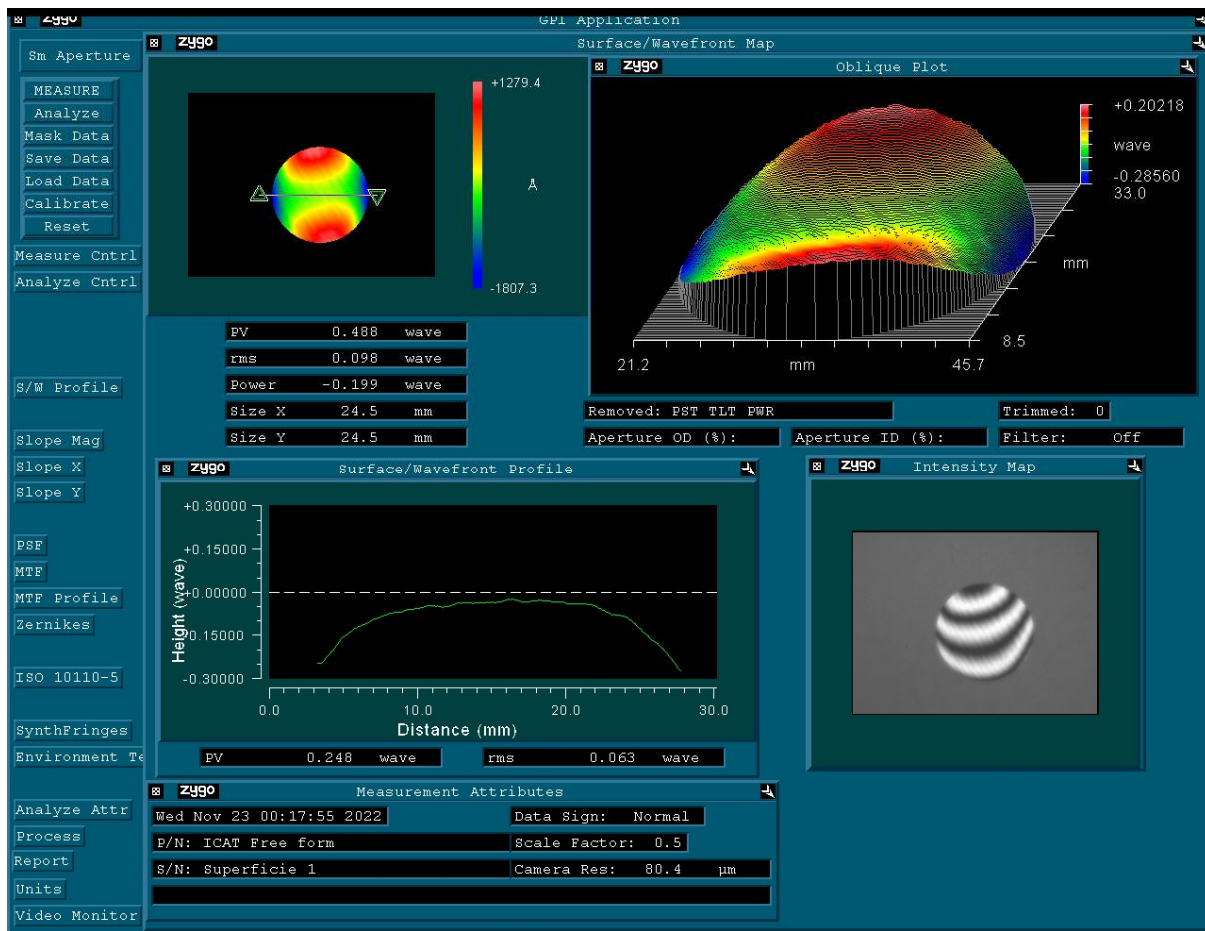


Figura 13. Evaluación de la superficie con un interferómetro de Fizeau de marca comercial ZYGO. (Imagen obtenida con el interferómetro Zygo del laboratorio de pruebas ópticas del instituto de Astrofísica de la UNAM).

4 Discusión.

Se ha evaluado la superficie de prueba con diferentes softwares de análisis de franjas, dando como resultado un valor del RMS aproximadamente igual en todos los casos, sin

embargo, para el valor del P-V el método SSPCA-PSI difiere en gran medida del resto de los métodos como se muestra en la tabla 1, esta diferencia se debe principalmente a que el método considera toda el área del interferograma para hacer el análisis, o dicho de otra manera evalúa toda el área de la superficie, en cambio en los otros métodos, se evita analizar las orillas, tal como es el caso del software Durango que solo evalúa la zona que se encuentra dentro del círculo en color rojo sobre el interferograma (Fig. 12)

Unidades de longitud de onda $\lambda = 632.28 \text{ nm}$

	SSCPA-PSI	FringeXP	Durango	Int. ZYGO
RMS	0.0164	0.155	0.1228	0.098
P-V	2	0.818	0.6406	0.488
Pistón	-0.01	0.945	0.1026	0.0932
Defoco		0.155	0.1157	0.1109
Tilt X		0.654	1.1384	1.1182
Tilt Y		-1.16	-0.0657	-0.0742
Aberraciones a 3er Orden				
Esférica	0.04	0.0697	0.0435	0.0424
Coma X	-0.01	-0.0139	-0.0556	-0.0456
Coma Y	0.01	0.0119	-0.0172	-0.0181
Astigmatismo 0°	-0.18	0.266	-0.2081	-0.1982
Astigmatismo 45°	0.09	0.135	-0.1089	-0.1137

Tabla 1. Comparación de los resultados obtenidos al evaluar la superficie de prueba con los diferentes Softwares.

Los valores de *Pistón*, *Defoco*, *Tilt X* (en la dirección X), *Tilt Y* (en la dirección Y) que se muestran en tabla 1, corresponden a errores de alineación que se cometen al colocar la superficie de prueba en el interferómetro, por lo tanto, no son aberraciones propias de la superficie y por tanto no deben ser consideradas para la reconstrucción de la superficie. En el caso del software SSPCA-PSI no hay valores reportados ya que este método elimina este tipo de errores al realizar el procesamiento de los interferogramas como se explico en la sección 3.1.

Por otra parte, los valores correspondientes a las aberraciones a tercer orden que son: *Esférica*, *Coma X*, *Coma Y*, *Astigmatismo 0°* y *Astigmatismo 45°*, estas si corresponden a deformaciones presentes en la superficie de prueba y como se puede observar en la tabla 1, los valores son aproximadamente iguales para los cuatro softwares utilizados.

Conclusiones

Se ha construido en el laboratorio un interferómetro de Fizeau para la evaluación de superficies ópticas utilizando la técnica de interferometría con desplazamiento de fase. El procesamiento de los interferogramas y la reconstrucción de la superficie se realiza con el algoritmo SSPCA-PSI (Moreno, 2021) y puede observarse en la tabla 1, que los resultados obtenidos son congruentes con los resultados de los programas comerciales, esto quiere decir, que hemos logrado construir un interferómetro capaz de medir con alta precisión y a un bajo costo.

La calidad óptica de la superficie de referencia que se usa en este interferómetro es $\lambda/10$ y recordando que la longitud de onda de la fuente de luz que se utiliza corresponde a la del láser de Helio-Neón ($\lambda = 632.28 \text{ nm}$), entonces el interferómetro será capaz de medir deformaciones tan pequeñas como 63.22 nm.

Agradecimientos

A la M. en I. Rosa Alejandra Ramírez Ramírez que en su estancia de maestría en el ICAT-UNAM construyó el interferómetro de Fizeau que se describe en este trabajo.

Al Dr. José Agustín Moreno Larios que como trabajo de tesis doctoral desarrolló el algoritmo SSPCA-PSI para la evaluación de los interferogramas

Al Dr. Rafael Izazaga Pérez jefe del taller de óptica del INAOE por su apoyo en la evaluación del interferograma con el software DURANGO.

Al Dr. Salvador Cuevas Cardona del Instituto de Astronomía de la UNAM por evaluar la superficie de prueba utilizando el Interferómetro de Fizeau de marca comercial ZYGO.

Al Instituto Nacional de Astrofísica Óptica y Electrónica por el uso del software utilizado en el desarrollo de este trabajo.

Al Instituto de Astronomía de la UNAM por uso de la infraestructura y equipo utilizado para realizar este trabajo.

Referencias Bibliográficas

Cornejo-Rodríguez A., (2007) Ronchi Test. **Optical Shop Testing**, Third Edition, Edited by Daniel Malaca, Copyright ©, John Wiley & Sons, p. 317-360.

<http://www.ceravolo.com/Fringe.html>.

<https://configure.techmfg.com/ecatalog/catalog/Optical%20Tops%20and%20Breadboards/75SSC-135-12>.

https://www.diffraction.com/durango_software.php.

<https://www.newport.com/n/spatial-filters>.

<https://www.newport.com/p/20QB20>.

<https://www.zygo.com/products/metrology-systems/laser-interferometers>.

Ojeda-Castañeda J., (2007) Foucault, Wire, and Phase Modulation Tests. **Optical Shop Testing**, Third Edition Edited by Daniel Malaca, Copyright ©, John Wiley & Sons, p. 275-313.

Mantravadi M. V. y Malacara D., (2007) Newton, Fizeau, and Haidinger Interferometers, **Optical Shop Testing**, Third Edition Edited by Daniel Malaca, Copyright ©, John Wiley & Sons, p. 1-44.

Moreno Larios, J. A. (2021): *Modelling and measurement of wavefront aberration using zernike polinomials for its application to the focusing of femtosecond laser pulses*, Tesis doctoral, UNAM, México.

Ramírez Ramírez, R. A. (2021), *Construcción de un interferómetro de Fizeau y el diseño del control para la toma de interferogramas*, Tesis de maestría, UNAM, México.

Virendra N. Mahajan, (2007) Zernike Polynomials and Wavefront Fitting. **Optical Shop Testing**, Third Edition Edited by Daniel Malaca, Copyright ©, John Wiley & Sons, p. 498-546.