



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA  
INGENIERÍA ELÉCTRICA – INSTRUMENTACIÓN

CONSTRUCCIÓN DE UN INTERFERÓMETRO DE FIZEAU Y EL DISEÑO DE  
CONTROL PARA LA TOMA DE INTERFEROGRAMAS

TESIS  
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:  
ING. ROSA ALEJANDRA RAMÍREZ RAMÍREZ

TUTOR PRINCIPAL  
DRA. MARTHA ROSETE AGUILAR, ICAT – UNAM

CIUDAD DE MÉXICO, JULIO 2021



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: DR. QURESHI NASER  
Secretario: DR. HERNÁNDEZ CORDERO JUAN A.  
1 er. Vocal: DRA. ROSETE AGUILAR MARTHA  
2 do. Vocal: DR. RODRÍGUEZ HERRERA OSCAR G.  
3 er. Vocal: DR. GARDUÑO MEJÍA JESÚS

Lugar donde se realizó la tesis: INSTITUTO DE CIENCIA APLICADA Y TECNOLOGÍA,  
UNAM

**TUTOR DE TESIS:**

DRA. MARTHA ROSETE AGUILAR

*Rosete Aguilar Martha*

---

**FIRMA**

# Agradecimientos

Gracias a mi madre Alejandra, por todo el cariño y apoyo que me ha brindado y lo seguirá haciendo, por hacerme sentir segura en cada paso que doy y por enseñarme a ser una persona perseverante.

Gracias a mi tutora la doctora Martha Rosete Aguilar, por compartirme sus conocimientos y por haberme dado la oportunidad de participar en su grupo de trabajo.

Gracias a los doctores Claudio Narciso Ramírez y Pedro Cebrian Xochihuila, por tener la paciencia y disposición para explicarme conceptos, por orientarme y resolverme dudas durante el desarrollo de mi trabajo de tesis.

Gracias a mi sínodo los doctores Naser Qureshi, Juan Cordero, Óscar Rodríguez y Jesús Garduño, por sus valiosos comentarios y correcciones a este trabajo de tesis.

Gracias al doctor José Agustín Moreno Larios, por su contribución en el análisis de los interferogramas presentado en este trabajo.

Gracias al Posgrado de Ingeniería y al Instituto de Ciencias Ampliadas y Tecnología de la UNAM, por la oportunidad que me brindaron para realizar mis estudios de maestría.

Gracias al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por la beca otorgada a lo largo de mis estudios de maestría.

Gracias a los proyectos PAPIIT IN107018, IN111818 y TA101020 del Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica de la Dirección General de Asuntos del Personal Académico de la DGAPA - UNAM.

Gracias a la Universidad Nacional Autónoma de México, mi alma mater, por haberme dado una formación no solo académica, sino también cultural y porque en ella he conocido personas que se han convertido en una parte importante de mi vida.

# Dedicatoria

*Para Marco. La vida no siempre es fácil, pero ten por seguro que yo siempre estaré ahí apoyándote y guiándote para que puedas alcanzar todos tus objetivos. Gracias por hacerme reír todo el tiempo.*

# Abstract

This work presents the construction of a Fizeau Interferometer and the development stages of a system that automates the capture of interferograms, which are subsequently analyzed with Phase Shift Interferometry in order to determine the shape of an optical surface. In this way, a functional optical instrument has been built in the *Laboratorio Universitario de Fabricación de Equipos Ópticos* (LUFABEO) of the Institute of Applied Sciences and Technology, to measure the shape of the surface of flat optical elements. The system consists of a Fizeau Interferometer with a collimated output beam that can measure optical surfaces up to two inches and its control for the acquisition of interferograms.

# Resumen

En este trabajo se presenta la construcción de un Interferómetro de Fizeau y las etapas de desarrollo de un sistema que automatiza la captura de interferogramas, los cuales son posteriormente analizados con Interferometría de Desplazamiento de Fase con el fin de determinar la forma de una superficie óptica. De esta manera se construyó un instrumento óptico funcional en el Laboratorio Universitario de Fabricación de Equipos Ópticos (LUFABEO) del Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología, destinado a medir la forma de la superficie de elementos ópticos planos. El sistema se compone de un Interferómetro de Fizeau con un haz de salida colimado que puede medir superficies ópticas de hasta dos pulgadas y el control para la adquisición de interferogramas.

# Índice general

<b>Abstract</b>	<b>III</b>
<b>Resumen</b>	<b>IV</b>
<b>Introducción</b>	<b>1</b>
<b>1. Interferómetro de Fizeau</b>	<b>3</b>
1.1. Conceptos básicos de interferencia . . . . .	3
1.1.1. Ecuación de onda . . . . .	3
1.1.2. Coherencia y condiciones de interferencia . . . . .	6
1.1.3. Interferencia . . . . .	7
1.2. Interferómetros . . . . .	10
1.2.1. Interferómetro por división de amplitud . . . . .	10
1.2.2. Interferómetro por división del frente de onda . . . . .	11
1.2.3. Interferómetro de Fizeau . . . . .	11
1.2.3.1. Localización de las franjas en el Interferómetro de Fizeau . . . . .	13
1.2.3.2. Diferencia de fase en el Interferómetro de Fizeau . . . . .	13
1.3. Interferómetro de desplazamiento lateral . . . . .	16
1.4. Construcción del Interferómetro de Fizeau . . . . .	18
1.5. Captura de los interferogramas . . . . .	23
<b>2. Sistema de Control del Interferómetro de Fizeau</b>	<b>26</b>
2.1. Antecedentes . . . . .	26
2.1.1. Kinesis . . . . .	27
2.1.2. SpinView . . . . .	28
2.2. Requerimientos del sistema . . . . .	29
2.3. Diseño . . . . .	30
2.3.1. Diseño estructural . . . . .	31
2.3.2. Diseño de la interfaz . . . . .	32
2.4. Implementación . . . . .	34
2.4.1. LabVIEW, software utilizado como herramientas de desarrollo . . . . .	34
2.4.2. Aspectos a considerar en la implementación del sistema de control . . . . .	35
2.5. Pruebas . . . . .	36
2.6. Trabajo a futuro . . . . .	40

---

<b>3. Medición de la fase por Interferometría de Desplazamiento de Fase</b>	<b>41</b>
3.1. Interferometría de desplazamiento de fase . . . . .	41
3.1.1. ¿Cómo se produce el cambio de fase? . . . . .	42
3.2. Algoritmos de Interferometría de Desplazamiento de Fase . . . . .	42
3.2.1. Algoritmo de mínimos cuadrados . . . . .	43
3.3. Desenvolvimiento de fase . . . . .	46
3.4. Errores en Interferometría de Desplazamiento de Fase . . . . .	47
3.4.1. Selección Autoadaptativa de Subbloques del Interferograma y Análisis de Componentes Principales (SSPCA) . . . . .	48
3.5. Diferencia de camino óptico . . . . .	49
3.6. Ajuste de los polinomios de Zernike a partir de la diferencia de camino óptico . . . . .	50
<b>4. Resultados y conclusiones</b>	<b>53</b>
4.1. Resultados . . . . .	53
4.2. Conclusiones . . . . .	62
<b>Bibliografía</b>	<b>63</b>
<b>Apendices</b>	<b>65</b>
<b>A. Elementos utilizados para la construcción del Interferómetro de Fizeau</b>	<b>65</b>
<b>B. Manual de usuario para el Sistema de Control del Interferómetro de Fizeau</b>	<b>66</b>
<b>Certificados</b>	<b>97</b>

# Introducción

La necesidad de fabricar componentes ópticos con más calidad es cada vez mayor por sus diferentes aplicaciones en los sectores científicos, tecnológicos e industriales, lo cual representa un reto para el área de fabricación y con ello el campo de las pruebas ópticas.

El Laboratorio Universitario de Fabricación de Equipos Ópticos (LAFUBEO) del Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología, se encuentra desarrollando instrumentación óptica con la finalidad de medir la forma de superficies ópticas planas, con un diámetro de hasta dos pulgadas y una desviación del valor cuadrático medio (RMS) de aproximadamente un cuarto de la longitud de onda de la luz en el visible, esto es, del orden de  $125 \text{ nm}$ .

La medida RMS es una forma de determinar las irregularidades de una superficie con respecto a una forma ideal plana. El costo de las componentes ópticas depende tanto del tipo y calidad del vidrio como de la calidad del pulido de la superficie. Pueden ser clasificadas como:

- Superficies de bajo costo  $RMS = \lambda/4$
- Superficies de costo moderado  $RMS = \lambda/8$
- Superficies de alto costo  $RMS = \lambda/16$

El LUFABEO cuenta con una máquina pulidora de control numérico que permite fabricar superficies con calidad óptica, desde baja hasta alta, pero se requiere medir la forma de la superficie para poder controlar el pulido que realiza la máquina.

Las técnicas interferométricas, logran una mayor precisión al momento de determinar la forma de las superficies ópticas.

El costo de los interferómetros comerciales para probar superficies ópticas planas es muy alto (aproximadamente \$400,000 dólares), y no se ha logrado obtener los recursos para adquirir un equipo como estos. Por ello, se propuso construir un interferómetro tipo Fizeau con el objetivo de poder medir superficies planas. Con el apoyo de los proyectos PAPIIT se han comprado los componentes necesarios para la implementación del interferómetro y la automatización de la toma de los interferogramas.

El objetivo de este proyecto es construir y automatizar un interferómetro de Fizeau que permita obtener interferogramas de manera eficiente, para analizarlos y determinar la forma de las superficies ópticas. El motivo por el cual se eligió un interferómetro de Fizeau fue porque en él, los haces de prueba y de referencia viajan por el mismo camino, haciéndolo menos sensible a vibraciones y

turbulencias.

Se sabe que los errores están presentes en cualquier instrumento de medición y pueden deberse a diversos factores, por ejemplo, al instrumento mismo, al operador, a las condiciones ambientales, entre otros. Una de las principales razones por las cuales se automatizó la adquisición de los interferogramas, fue disminuir en gran medida algunos efectos producidos por los errores antes mencionados y por lo tanto introducir menos ruido en la captura de los interferogramas. Otro motivo para hacerlo automático fue que cualquier persona, no importando su conocimiento en el interferómetro, pueda manejarlo, quedando así un instrumento funcional en el Laboratorio Universitario de Fabricación de Equipos Ópticos del ICAT.

Los interferogramas son capturados digitalmente con una cámara de video de semiconductor complementario de óxido metálico (CMOS). Para su análisis se usa la técnica Interferometría por Desplazamiento de Fase (PSI - *phase shifting interferometry*), que requiere de al menos tres interferogramas con un cambio de fase constante entre ellos. El cambio de fase se produce desplazando una placa interferométrica a lo largo del eje óptico del haz, lo que genera una diferencia de camino óptico entre la placa y la superficie bajo prueba.

PSI permite la repetibilidad, precisión y exactitud, y hace un análisis más completo de los datos de la superficie y el frente de onda.

En este trabajo se presentan los pasos para construir y alinear un interferómetro de Fizeau; las etapas del desarrollo del sistema que automatiza y controla la adquisición de interferogramas; y el análisis de los interferogramas con la técnica Interferometría de Desplazamiento de Fase.

# Capítulo 1

## Interferómetro de Fizeau

En este capítulo se presenta el concepto de interferencia y las condiciones para lograrla, partiendo de la ecuación de onda. También se describe el Interferómetro de Fizeau y los pasos que se siguieron para construir uno de estos, así como los diferentes elementos que lo componen.

### 1.1. Conceptos básicos de interferencia

#### 1.1.1. Ecuación de onda

Se puede considerar la luz como una onda electromagnética transversal propagándose en el espacio, con un campo eléctrico  $E$  y un campo magnético  $H$  perpendiculares entre sí, la cual se puede escribir matemáticamente como una ecuación diferencial, conocida como ecuación de onda.

Se parte de las ecuaciones de Maxwell para escribir la ecuación de onda. Considerando cualquier medio, ya sea dieléctrico, metal o incluso el vacío, con la única condición de que no haya cargas o corrientes libres externas, es decir que  $\rho = 0$  y  $J = 0$ , entonces las ecuaciones de Maxwell en forma diferencial son:

$$\nabla \times E = -\mu \frac{\partial H}{\partial t} \quad (1.1)$$

$$\nabla \times H = \sigma E + \varepsilon \frac{\partial E}{\partial t} \quad (1.2)$$

$$\nabla \cdot E = 0 \quad (1.3)$$

$$\nabla \cdot H = 0 \quad (1.4)$$

Considerando la identidad vectorial:

$$\nabla \times (\nabla \times E) = \nabla(\nabla \cdot E) - \nabla^2 E$$

Y dado que  $\nabla \cdot E = 0$ , se tiene que:

$$\nabla \times (\nabla \times E) = -\nabla^2 E \quad (1.5)$$

Reescribiendo el lado izquierdo de la expresión 1.5:

$$\nabla \times (\nabla \times E) = \nabla \times \left( -\mu \frac{\partial H}{\partial t} \right) = -\mu \frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times H) \quad (1.6)$$

Sustituyendo la ecuación 1.2 en la expresión 1.6:

$$-\mu \frac{\partial}{\partial t} \left( \sigma E + \epsilon \frac{\partial E}{\partial t} \right) \quad (1.7)$$

Sustituyendo la expresión 1.7 en la expresión 1.5:

$$-\mu \frac{\partial}{\partial t} \left( \sigma E + \epsilon \frac{\partial E}{\partial t} \right) = -\nabla^2 E \quad (1.8)$$

Entonces, la ecuación de onda diferencial válida para cualquier medio sin cargas ni corrientes libres es:

$$\nabla^2 E = \mu\sigma \frac{\partial E}{\partial t} + \mu\epsilon \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \quad (1.9)$$

Considerando el caso donde el medio es dieléctrico, es decir la conductividad es nula  $\sigma = 0$  y además la onda se encuentra en el vacío (espacio libre), la ecuación 1.9 queda como:

$$\begin{aligned} \nabla^2 E &= \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \\ \nabla^2 E - \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} &= 0 \end{aligned} \quad (1.10)$$

Donde  $\mu_0$  y  $\epsilon_0$  son la permeabilidad magnética y permitividad eléctrica en el vacío, respectivamente.

Se propone la siguiente solución a la ecuación de onda diferencial, para una onda propagándose en dirección  $x$ :

$$E(x, t) = A \exp[i(kx - \omega t)] \quad (1.11)$$

Donde  $\omega = 2\pi\nu$ ,  $k = \omega\sqrt{\mu_0\epsilon_0}$  y  $A$  es la amplitud de la onda.

Obteniendo la segunda derivada respecto al tiempo de la ecuación 1.11:

$$\frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = -\omega^2 A \exp[i(kx - \omega t)] \quad (1.12)$$

Sustituyendo las ecuaciones 1.11 y 1.12 en la ecuación 1.10:

$$\nabla^2 A \exp[i(kx - \omega t)] + \mu_0 \epsilon_0 \omega^2 A \exp[i(kx - \omega t)] = 0 \quad (1.13)$$

Factorizando y despejando  $\exp[-i(\omega t)]$ :

$$\begin{aligned} \nabla^2 A \exp[i(kx)] \exp[-i(\omega t)] + \mu_0 \epsilon_0 \omega^2 A \exp[i(kx)] \exp[-i(\omega t)] &= 0 \\ \nabla^2 A \exp[i(kx)] + \mu_0 \epsilon_0 \omega^2 A \exp[i(kx)] &= 0 \end{aligned} \quad (1.14)$$

Notar que la ecuación 1.14 solo depende de la parte espacial de la onda, a esta ecuación se le conoce como la Ecuación de Helmholtz.

Desarrollando el laplaciano de la ecuación 1.14:

$$\nabla^2 Aexp[i(kx)] = \frac{\partial^2 Aexp[i(kx)]}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 Aexp[i(kx)]}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 Aexp[i(kx)]}{\partial z^2} \quad (1.15)$$

El campo  $Aexp[i(kx)]$  no tiene dependencia ni en  $y$  ni en  $z$ , por lo que:

$$\frac{\partial^2 Aexp[i(kx)]}{\partial y^2} = \frac{\partial^2 Aexp[i(kx)]}{\partial z^2} = 0$$

Entonces:

$$\nabla^2 Aexp[i(kx)] = \frac{\partial^2 Aexp[i(kx)]}{\partial x^2} \quad (1.16)$$

Obteniendo la segunda derivada respecto a  $x$  del campo  $Aexp[i(kx)]$ :

$$\frac{\partial^2 Aexp[i(kx)]}{\partial x^2} = -k^2 Aexp[i(kx)] \quad (1.17)$$

Sustituyendo la ecuación 1.17 en la ecuación 1.14:

$$-k^2 Aexp[i(kx)] + \mu_0^2 \varepsilon_0^2 \omega^2 Aexp[i(kx)] = 0 \quad (1.18)$$

Factorizando y despejando  $Aexp[i(kx)]$ :

$$\begin{aligned} -k^2 + \mu_0 \varepsilon_0 \omega^2 &= 0 \\ k^2 &= \mu_0 \varepsilon_0 \omega^2 \\ \frac{\omega}{k} &= \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}} = v \end{aligned}$$

Donde  $\mu_0 \varepsilon_0 \approx (8,85 \times 10^{-12} s^2 \cdot C^2 / m^3 \cdot kg) (4\pi \times 10^{-7} m \cdot kg / C^2) \approx 11,12 \times 10^{-18} s^2 / m^2$ , entonces:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}} \approx 3 \times 10^8 m/s$$

$v$  es la velocidad prevista de todas las ondas electromagnéticas en el vacío, este valor está cercano al de la luz, lo cual concluye que la luz es una perturbación electromagnética en forma de ondas. Es habitual escribir la velocidad de la luz en el vacío con el símbolo  $C$ .

De forma lineal, la ecuación 1.11 queda como:

$$E(x, t) = A \cos [kx - \omega t + \varphi_0] \quad (1.19)$$

Donde  $\varphi_0$  es la fase inicial de la onda cuando  $x = 0$  y  $t = 0$  y  $k = 2\pi/\lambda_m$ .

En la figura 1.1 se puede observar la representación gráfica de una onda, así como los parámetros de la describen.

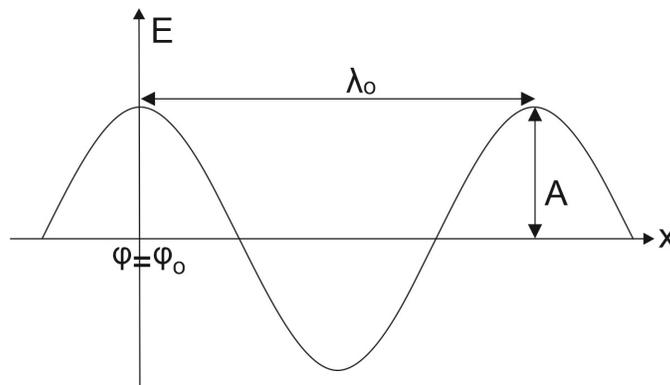


Figura 1.1: Parámetros que describen a la onda.

### 1.1.2. Coherencia y condiciones de interferencia

En óptica, la coherencia, se puede definir como la capacidad que tienen las ondas o las fuentes para interferir entre sí. Esta capacidad es mayor entre más relacionadas y sincronizadas estén las fases de las ondas.

**Coherencia Temporal:** Cuando las ondas que están interfiriendo llegan al punto de observación por la misma trayectoria y además salieron de la misma fuente y dirección, la diferencia de fase entre ellas está dada únicamente por la diferencia entre sus tiempos de viaje. Está directamente relacionado con la diferencia de camino óptico.

**Coherencia Espacial:** Cuando las ondas que están interfiriendo provienen de fuentes separadas, pero a igual distancia del punto de observación. Esto no significa precisamente que hay dos fuentes, sino que puede ser la misma fuente pasando por una rendija.

Para poder observar interferencia es necesario cumplir con las siguientes condiciones:

- Coherencia, es decir, la diferencia de fase entre las dos ondas debe ser constante para cada punto del espacio independiente del tiempo.
- Ondas de la misma frecuencia.
- Las irradiancias deben ser similares en amplitud  $A_1 \approx A_2$  para mejor visibilidad en el contraste de las franjas, pues si una de las amplitudes dominara respecto a la otra, la diferencia entre un máximo y un mínimo sería pequeña.
- Estado de polarización.

En la ecuación de interferencia 1.36 (de la superposición de dos ondas), aparece un término conocido como el término de interferencia. Si se considera que las ondas son vectores, la multiplicación es en realidad el producto punto entre dos vectores.

Si las dos ondas están linealmente polarizadas, pero tienen estados de polarización ortogonales entre sí, entonces el término de interferencia es cero y no se observará el fenómeno de interferencia.

Por otro lado, si las ondas tienen estados de polarización paralelos entre sí, el término de interferencia variará como función del coseno del ángulo, que es la fase relativa entre las dos ondas que interfieren. Dependiendo del valor de la fase relativa, el término de interferencia dará lugar a interferencia constructiva o destructiva.

Para otros estados de polarización, la interferencia estará presente siempre que existan dos componentes de los campos eléctricos que sean paralelas entre sí.

### 1.1.3. Interferencia

Cuando dos o más ondas se superponen surge un fenómeno conocido como interferencia. En la superposición de ondas existen dos casos: 1) cuando las ondas tienen la misma frecuencia y 2) cuando tienen diferentes frecuencias. El caso de interés para este trabajo es cuando las ondas tienen la misma frecuencia, pues provienen de la misma fuente; y no se está modulando la amplitud, cosa que pasa en el segundo caso.

La longitud de onda de la luz visible se encuentra en un rango de 400 nm a 700 nm aproximadamente, por lo tanto, su período de oscilación es muy pequeño y no se puede medir directamente con algún detector. Es por ello que el único parámetro medible de interés es la irradiancia, la cual está dada por:

$$I = \varepsilon\nu\langle E^2 \rangle_t \quad (1.20)$$

Donde  $\langle \rangle_t$  es el promedio temporal.

Pensar que dos ondas  $E_1$  y  $E_2$  interfieren, gracias al principio de superposición la onda resultante se puede expresar como:

$$E = E_1 + E_2 = A_1 \cos(k_1 x_1 - \omega t + \varphi_{01}) + A_2 \cos(k_2 x_2 - \omega t + \varphi_{02}) \quad (1.21)$$

Suponer que  $E_1$  y  $E_2$  son vectores paralelos entre sí, porque si fuesen perpendiculares, el producto punto daría cero, lo cual quiere decir que no hay interacción entre los campos. Entonces:

$$E^2 = E \cdot E = (E_1 + E_2) \cdot (E_1 + E_2) \quad (1.22)$$

$$E^2 = E_1^2 + E_2^2 + 2(E_1 \cdot E_2) \quad (1.23)$$

Desarrollando el término  $E_1 \cdot E_2$ :

$$E_1 \cdot E_2 = A_1 \cos(k_1 x_1 - \omega t + \varphi_{01}) \cdot A_2 \cos(k_2 x_2 - \omega t + \varphi_{02}) \quad (1.24)$$

Dada la identidad trigonométrica  $\cos(a \pm b) = \cos(a)\cos(b) \mp \sin(a)\sin(b)$ , la ecuación 1.24 se puede reescribir como:

$$\begin{aligned} E_1 \cdot E_2 &= A_1 A_2 [\cos(k_1 x_1 + \varphi_{01}) \cos(\omega t) + \sin(k_1 x_1 + \varphi_{01}) \sin(\omega t)] \\ &\quad \times [\cos(k_2 x_2 + \varphi_{02}) \cos(\omega t) + \sin(k_2 x_2 + \varphi_{02}) \sin(\omega t)] \\ &= A_1 A_2 [\cos(k_1 x_1 + \varphi_{01}) \cos(k_2 x_2 + \varphi_{02}) \cos^2(\omega t) \\ &\quad + \sin(k_1 x_1 + \varphi_{01}) \sin(k_2 x_2 + \varphi_{02}) \sin^2(\omega t) \\ &\quad + \cos(k_1 x_1 + \varphi_{01}) \sin(k_2 x_2 + \varphi_{02}) \sin(\omega t) \cos(\omega t) \\ &\quad + \cos(k_2 x_2 + \varphi_{02}) \sin(k_1 x_1 + \varphi_{01}) \sin(\omega t) \cos(\omega t)] \end{aligned} \quad (1.25)$$

El promedio temporal se calcula como:

$$\langle f(t) \rangle = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} f(t') dt' \quad (1.26)$$

Proponiendo  $t = 0$ , y calculando el promedio temporal para los términos que dependen del tiempo:

$$\begin{aligned} \langle \cos^2(\omega t) \rangle &= \frac{1}{T} \int_0^T \cos^2(\omega t') dt' \\ \langle \sin^2(\omega t) \rangle &= \frac{1}{T} \int_0^T \sin^2(\omega t') dt' \\ \langle \cos(\omega t) \sin(\omega t) \rangle &= \frac{1}{T} \int_0^T \cos(\omega t') \sin(\omega t') dt' \end{aligned}$$

Resolviendo cada integral, suponiendo que el tiempo de integración es un número múltiplo del tiempo de oscilación, de tal manera que la integral del coseno y del seno sean cero:

$$\begin{aligned} \frac{1}{T} \int_0^T \cos^2(\omega t') dt' &= \frac{1}{T} \int_0^T \frac{1 + \cos(2\omega t')}{2} dt' = \frac{1}{2T} \int_0^T 1 + \cos(2\omega t') dt' \\ &= \frac{1}{2T} [t']_0^T = \frac{1}{2T} [T] = \frac{1}{2} \end{aligned} \quad (1.27)$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{T} \int_0^T \sin^2(\omega t') dt' &= \frac{1}{T} \int_0^T \frac{1 - \cos(2\omega t')}{2} dt' = \frac{1}{2T} \int_0^T 1 - \cos(2\omega t') dt' \\ &= \frac{1}{2T} [t']_0^T = \frac{1}{2T} [T] = \frac{1}{2} \end{aligned} \quad (1.28)$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{T} \int_0^T \sin(\omega t') \cos(\omega t') dt' &= \frac{1}{T} \int_0^T \frac{1}{2} [\sin((\omega + \omega)t') + \sin((\omega - \omega)t')] dt' \\ &= \frac{1}{T} \int_0^T \frac{1}{2} [\sin(2\omega t') + \sin(0)] dt' = 0 \end{aligned} \quad (1.29)$$

Entonces  $\langle E_1 \cdot E_2 \rangle$  es:

$$\langle E_1 \cdot E_2 \rangle = \frac{1}{2} A_1 A_2 [\cos(k_1 x_1 + \varphi_{01}) \cos(k_2 x_2 + \varphi_{02}) + \sin(k_1 x_1 + \varphi_{01}) \sin(k_2 x_2 + \varphi_{02})] \quad (1.30)$$

Usando la identidad  $\cos(a \pm b) = \cos(a)\cos(b) \mp \sin(a)\sin(b)$  la expresión 1.31 queda como:

$$\langle E_1 \cdot E_2 \rangle = \frac{1}{2} A_1 A_2 \cos(k_1 x_1 + \varphi_{01} - k_2 x_2 - \varphi_{02}) \quad (1.31)$$

Desarrollando los términos  $E_1^2$  y  $E_2^2$  de la ecuación 1.23, se tiene:

$$E_1^2 = E_1 \cdot E_1 = A_1 \cos(k_1 x_1 - \omega t + \varphi_{01}) \cdot A_1 \cos(k_1 x_1 - \omega t + \varphi_{01}) \quad (1.32)$$

Recordando que  $\cos(a \pm b) = \cos(a)\cos(b) \mp \sin(a)\sin(b)$ , entonces:

$$\begin{aligned} E_1^2 &= A_1^2 [\cos(k_1x_1 + \varphi_{01}) \cos(\omega t) + \sin(k_1x_1 + \varphi_{01}) \sin(\omega t)] \\ &\quad \times [\cos(k_1x_1 + \varphi_{01}) \cos(\omega t) + \sin(k_1x_1 + \varphi_{01}) \sin(\omega t)] \\ &= A_1^2 [\cos^2(k_1x_1 + \varphi_{01}) \cos^2(\omega t) + \sin^2(k_1x_1 + \varphi_{01}) \sin^2(\omega t) \\ &\quad + 2\cos(k_1x_1 + \varphi_{01}) \sin(k_1x_1 + \varphi_{01}) \sin(\omega t) \cos(\omega t)] \end{aligned} \quad (1.33)$$

De las integrales 1.27, 1.28 y 1.29, se sabe que los promedios temporales de  $\cos^2(\omega t)$ ,  $\sin^2(\omega t)$  y  $\sin(\omega t) \cos(\omega t)$ , son  $1/2$ ,  $1/2$  y  $0$  respectivamente. De modo que el promedio temporal de  $E_1^2$  es:

$$\langle E_1^2 \rangle = A_1^2 \left[ \frac{1}{2} \cos^2(k_1x_1 + \varphi_{01}) + \frac{1}{2} \sin^2(k_1x_1 + \varphi_{01}) \right] = \frac{1}{2} A_1^2 \quad (1.34)$$

De manera similar se obtiene  $\langle E_2^2 \rangle$ :

$$\langle E_2^2 \rangle = \frac{1}{2} A_2^2 \quad (1.35)$$

Finalmente, la irradiancia de la suma de dos ondas es:

$$I = \frac{1}{2} \varepsilon v [A_1^2 + A_2^2 + A_1 A_2 \cos(k_1x_1 + \varphi_{01} - k_2x_2 - \varphi_{02})] \quad (1.36)$$

Reescribiendo la ecuación 1.36 en términos de las intensidades:

$$I = I_1 + I_2 + I_{12} \quad (1.37)$$

Donde el termino  $I_{12}$  es conocido como el termino de interferencia.

Si la fase  $\delta = k_1x_1 + \varphi_{01} - k_2x_2 - \varphi_{02}$ , entonces:

$$I_{12} = A_1 A_2 \cos(\delta) \quad (1.38)$$

Entonces la expresión 1.37 queda como:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\delta) \quad (1.39)$$

Si  $\delta = 0$  ó  $\delta = 2m\pi$  donde  $m$  es un entero, se tiene interferencia constructiva.

$$I_{max} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2}$$

Si  $\delta = \pi$  ó  $\delta = (2m + 1)\pi$  donde  $m$  es un entero, se tiene interferencia destructiva.

$$I_{min} = I_1 + I_2 - 2\sqrt{I_1 I_2}$$

En la figura 1.2 se muestra la distribución de las intensidades, resultado de graficar la expresión 1.39, con el fin de ejemplificar los máximos y mínimos de la función que dependen del valor de la fase  $\delta$ .

En la gráfica presentada en la figura 1.2, los mínimos no llegan a cero porque las intensidades  $I_1$  e  $I_2$  no son iguales.

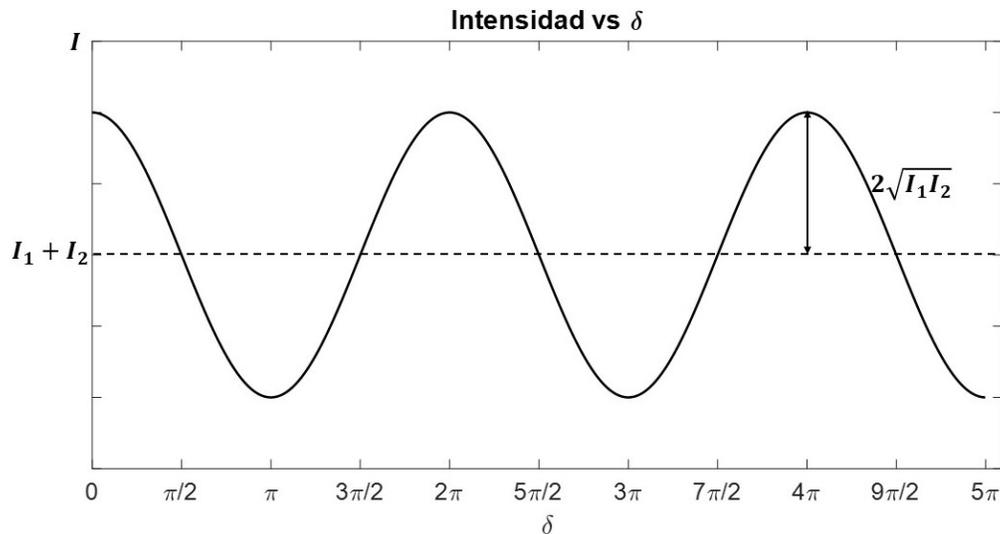


Figura 1.2: Distribución de intensidades de un patrón de interferencia.

## 1.2. Interferómetros

La principal herramienta para las pruebas ópticas de alta precisión, son los interferómetros, los cuales son dispositivos en los que su principio de funcionamiento es la interferencia de ondas de luz para realizar medidas del orden de fracciones de la longitud de onda del espectro visible. Una superficie puede considerarse de alta precisión si tiene un  $RMS \leq \lambda/10$ . La desviación del valor cuadrático medio,  $RSM$ , es una forma de medir la irregularidad de la superficie con respecto a una forma ideal plana.

Para poder observar interferencia es necesario que la diferencia de fase entre las dos ondas sea constante independiente del tiempo. Este requisito se cumple si las ondas derivan de la misma fuente. Se usan dos métodos para obtener dos haces de una sola fuente, lo cual divide a los interferómetros en dos grandes categorías:

- Interferómetro por división de amplitud.
- Interferómetro por división del frente de onda.

### 1.2.1. Interferómetro por división de amplitud

En el método de división de amplitud, se divide al haz original en dos haces, con ayuda de un divisor de haz, una rejilla de difracción o un prisma polarizador.

En el interferómetro construido se utilizó una placa transparente recubierta por una película parcialmente reflectante que transmite un haz y refleja el otro, conocido como divisor de haz.

Algunos interferómetros comunes de división de amplitud son:

- Interferómetro de Rayleigh.
- Interferómetro de Michelson (Twyman-Green).
- Interferómetro de Mach-Zehnder.

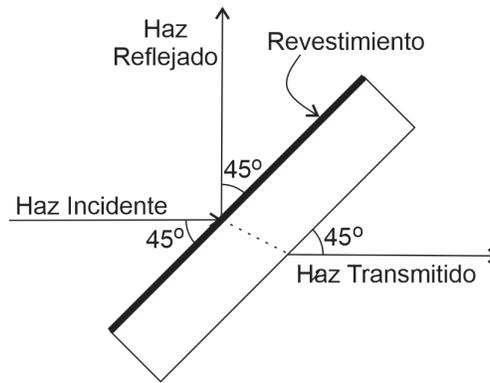


Figura 1.3: Divisor de haz.

### 1.2.2. Interferómetro por división del frente de onda

Los interferómetros de esta categoría usan una configuración en las que el haz se divide cuando pasa a través de unas aberturas colocadas una al lado de la otra, como se muestra en la figura 1.4.

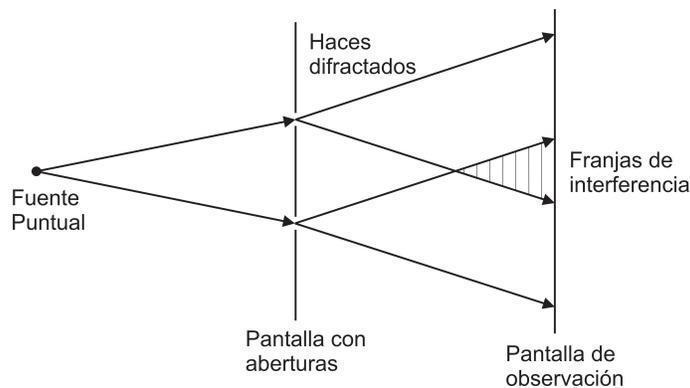


Figura 1.4: Interferencia de dos haces formados por división de frente de onda.

El ejemplo más importante de este tipo de interferómetros es la configuración de la doble rendija de Young.

El método relevante para este trabajo es el de división de amplitud. Ya que, el Interferómetro de Fizeau construido, pertenecen a esta categoría.

### 1.2.3. Interferómetro de Fizeau

En el Interferómetro de Fizeau, ilustrado en la figura 1.5, una superficie de referencia (placa interferométrica), se coloca frente a una superficie de prueba, haciendo que los haces viajen por el mismo camino y gracias a la diferencia entre las trayectorias se forma un patrón de interferencia.

En la figura 1.5, la línea blanca representará el rayo reflejado de la superficie bajo prueba y la línea gris representa el rayo reflejado de la placa interferométrica.

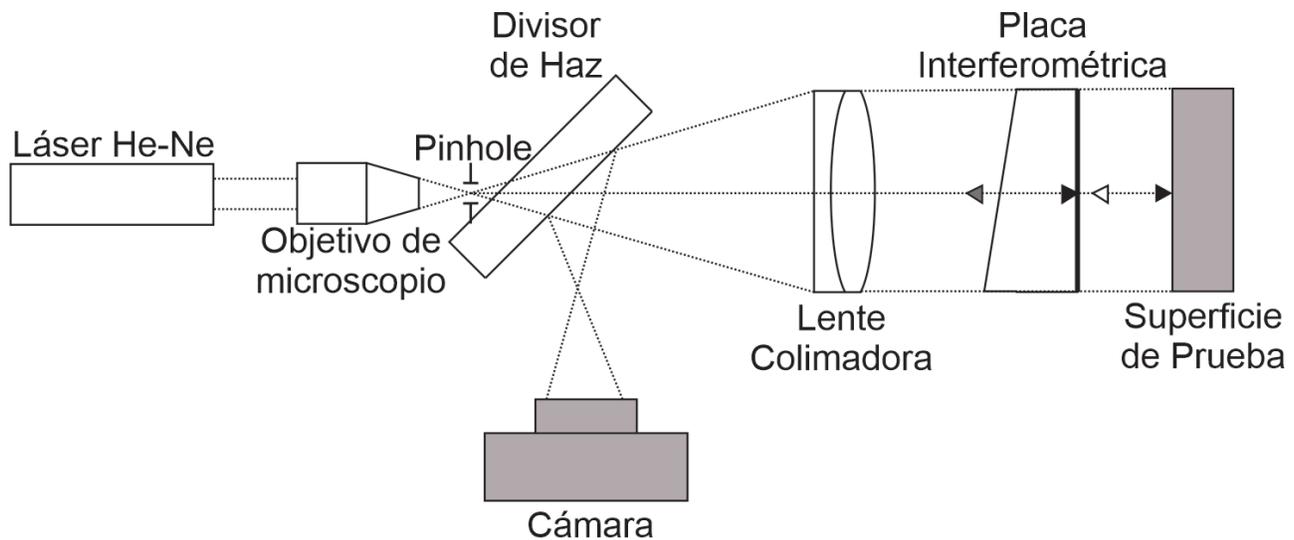


Figura 1.5: Esquema del Interferómetro de Fizeau construido.

En el Interferómetro de Fizeau, el haz del láser pasa a través de un sistema conocido como filtro espacial, el cual está formado por un objetivo de microscopio y una abertura circular (*pinhole*), este sistema es usado comúnmente para limpiar el haz que sale del láser, el objetivo de microscopio enfoca el haz, lo cual produce una fuente puntual y el *pinhole* bloquea los anillos secundarios generados por la difracción causada por el enfocamiento del haz, pasando así solamente el *spot* central.

Los rayos que divergen llegan a una lente la cual los colima, es decir, convierte a todos los rayos del haz divergente en un conjunto de rayos paralelos entre sí, y el frente de onda que antes era esférico se vuelve plano.

El haz colimado pasa por la placa interferométrica y se refleja en la superficie de prueba. La placa interferométrica tiene una cuña en una de sus caras, que desvía la luz de la trayectoria original. La cuña debe colocarse hacia el filtro espacial. La luz que se refleja en la segunda cara de la placa interferométrica, la que está más cerca de la superficie bajo prueba, es la que genera el haz de referencia, el haz que interfiere con aquel que proviene de la superficie bajo prueba. La figura 1.5 no se dibujó a escala, con el fin de mostrar cuál de las dos caras de la placa tiene la cuña y cuál es la que produce el frente de onda de referencia. En la placa interferométrica real no se puede ver a simple vista cual es la superficie que tiene la cuña, por lo que es necesario observar la reflexión de las dos superficies para identificarla.

La lente colimadora también sirve para concentrar la luz que viaja de regreso hacia el plano de observación, de esta manera es posible observar el patrón de interferencia completo. Los haces que regresan son reflejados por el divisor de haz hacia el plano de observación. En el interferómetro construido, es en este plano donde se colocó la cámara CMOS para capturar los interferogramas.

El Interferómetro de Fizeau es una de las herramientas de metrología más utilizada en pruebas ópticas. Este interferómetro suele determinar la planitud de las superficies ópticas, lo que sirve para evaluar la calidad de distintos elementos ópticos, incluyendo placas transparentes para comprobar paralelismo y homogeneidad. También es posible probar superficies cóncavas y convexas. [1]

### 1.2.3.1. Localización de las franjas en el Interferómetro de Fizeau

Es necesario saber dónde se encuentran localizadas las franjas en los equipos interferométricos, para saber dónde colocar el detector (cámara, telescopio, ojo). Por lo que es importante clasificar a las franjas en dos tipos:

- Franjas localizadas: Se ven en un espacio determinado.
- Franjas no localizadas: Se ven a cualquier distancia.

Dicho lo anterior, las franjas visualizadas por el Interferómetro de Fizeau construido son no localizadas, pues se pueden observar en cualquier punto del espacio.

### 1.2.3.2. Diferencia de fase en el Interferómetro de Fizeau

Se determinó la diferencia de fase entre los dos haces (de prueba y de referencia), en el Interferómetro de Fizeau construido. Para llegar a el resultado final, se analizaron 3 conceptos:

- Diferencia de fase en franjas de igual inclinación o de Haidinger
- Diferencia de fase en franjas de igual espesor o de Fizeau
- Cambio de fase por reflexión interna y externa

#### Diferencia de fase en franjas de igual inclinación o de Haidinger

Las franjas de igual inclinación, también conocidas como franjas de Haidinger, se forman a partir de los rayos que tienen una misma inclinación respecto a las superficies reflectoras, es decir, rayos paralelos entre sí. Para que todos los rayos reflejados tengan la misma inclinación es necesario que la separación entre ambas superficies no varíe.

Considerar que en la figura 1.6 las superficies representan a la placa interferométrica y a la superficie bajo prueba, donde  $d$  es la separación entre ambos elementos. Se hizo el análisis para determinar la diferencia de fase entre los dos haces, dada simplemente por la diferencia de camino óptico resultante de la separación que hay entre la placa interferométrica y la superficie bajo prueba.

En la figura 1.6, la diferencia de camino óptico  $DCO$  en los rayos que llegan a los puntos  $C$  y  $D$  es:

$$DCO = n_t(\overline{AB} + \overline{BC}) - n_i\overline{AD}$$

Se sabe que:

$$\overline{AB} = \overline{BC} = \frac{d}{\cos\theta_t}$$

Entonces:

$$\overline{AB} + \overline{BC} = \frac{2d}{\cos\theta_t}$$

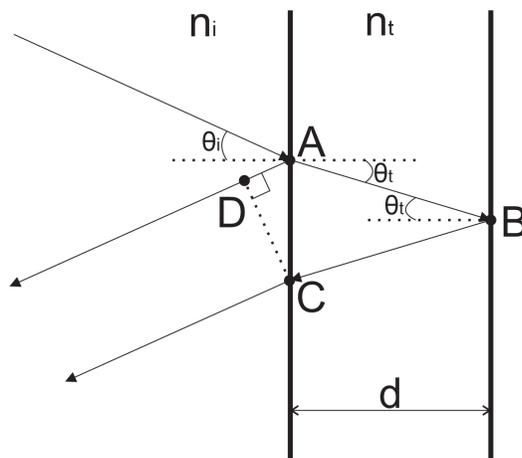


Figura 1.6: Cálculo de la diferencia de fase para franjas de igual inclinación o de Haidinger.

Ahora calculando  $\overline{AD}$ :

$$\begin{aligned} \sin\theta_i &= \frac{\overline{AD}}{\overline{AC}} \rightarrow \overline{AD} = \overline{AC} \sin\theta_i = \overline{AC} \frac{n_t}{n_i} \sin\theta_t \\ \overline{AC} &= 2d \tan\theta_t \\ \overline{AD} &= 2d \tan\theta_t \frac{n_t}{n_i} \sin\theta_t \end{aligned}$$

Finalmente, la DCO es:

$$DCO = n_t \left( \frac{2d}{\cos\theta_t} \right) - n_i 2d \tan\theta_t \frac{n_t}{n_i} \sin\theta_t$$

Entonces la diferencia de fase  $\delta$  entre los rayos es:

$$\begin{aligned} \delta &= k_t(\overline{AB} + \overline{BC}) - k_i \overline{AD} \\ \delta &= k_t \frac{2d}{\cos\theta_t} - k_i 2d \tan\theta_t \frac{n_t}{n_i} \sin\theta_t \end{aligned}$$

Si  $\theta_t = \frac{n_t}{n_i} \theta_i$  y  $k_t = k_i \frac{n_t}{n_i}$ , entonces la diferencia de fase es:

$$\delta = k_i \frac{n_t}{n_i} \frac{2d}{\cos\left(\frac{n_t}{n_i} \theta_i\right)} - k_i \frac{n_t}{n_i} 2d \tan\left(\frac{n_t}{n_i} \theta_i\right) \sin\left(\frac{n_t}{n_i} \theta_i\right)$$

En el Interferómetro de Fizeau, el haz llega centrado en el eje óptico, por lo que  $\theta_i = 0$  y además  $n_i = n_t = 1$  porque se encuentra en aire, por lo que la diferencia de fase es:

$$\begin{aligned} \delta &= k_i 2d = \frac{2\pi}{\lambda} 2d \\ \delta &= \frac{4\pi d}{\lambda} \end{aligned} \tag{1.40}$$

### Diferencia de fase en franjas de igual espesor o de Fizeau

Las franjas de igual espesor, también conocidas como franjas de Fizeau, se forman a partir de todos los puntos que tienen la misma separación entre las superficies. En la figura 1.7 (a) hay dos

superficies planas inclinadas una con respecto a la otra. En la figura 1.7 (b) se pueden observar este tipo de franjas.

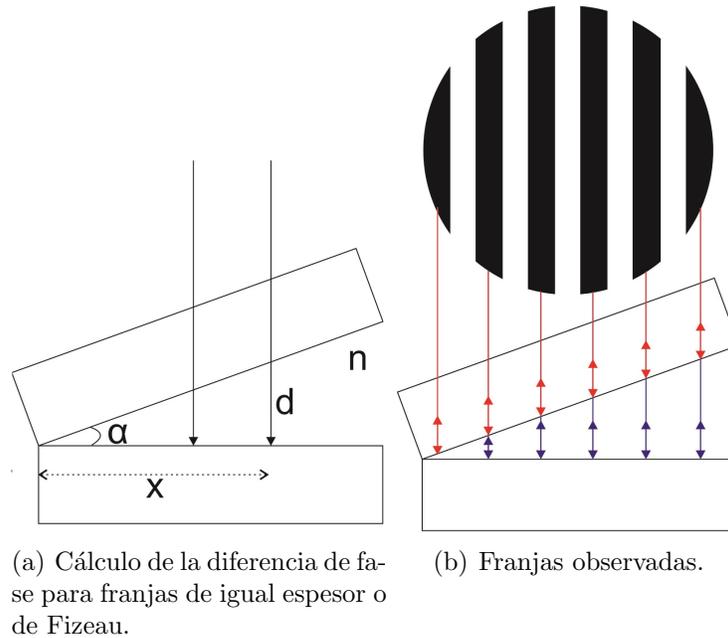


Figura 1.7: Franjas de igual espesor o de Fizeau.

La diferencia de camino óptico es:

$$DCO = 2nd$$

$$\tan(\alpha) = \frac{d}{x} \rightarrow d = x \tan(\alpha)$$

$$DCO = 2nx \tan(\alpha)$$

El índice de refracción  $n$  es igual a 1, dado que las placas están en aire. Multiplicando por el número de onda  $k$ , se obtiene la diferencia de fase:

$$\delta = 2kx \tan(\alpha) = 2 \frac{2\pi}{\lambda} x \tan(\alpha)$$

$$\delta = \frac{4\pi}{\lambda} x \tan(\alpha) \quad (1.41)$$

La diferencia de fase dada por la ecuación 1.41 es una diferencia de fase adicional, provocada por la inclinación que hay entre las dos superficies, cuando la superficie de referencia y la de prueba no son perfectamente paralelas entre sí, y hay un pequeño ángulo entre ellas, entonces se forman franjas de igual espesor o de Fizeau.

### Cambio de fase por reflexión interna y externa

Gracias a la interpretación de las ecuaciones de Fresnel, se sabe que la onda reflejada sufre un cambio de fase dependiendo de su polarización al traspasar el medio. Si el medio incidente tiene un índice de refracción mayor al del medio transmitido, hay reflexión interna, contrariamente, cuando

el medio incidente tiene un índice de refracción menor que el medio transmitido, existe reflexión externa.

En el Interferómetro de Fizeau construido, el haz de referencia sufre reflexión interna pues el medio incidente es vidrio y el transmitido es aire. De manera distinta, hay reflexión externa con el haz de prueba, al propagarse en aire y reflejarse en vidrio.

Recordar que el haz se está propagando centrado en el eje óptico, es decir, con un ángulo de incidencia de  $0^\circ$ . De acuerdo con las gráficas de cambio de fase, resultantes del análisis de cambio de signo de los coeficientes de reflexión de Fresnel [2], hay un cambio de fase relativo entre la reflexión interna y externa a  $0^\circ$  de  $\pi$ , tanto para la componente paralela como para la ortogonal.

Finalmente, la diferencia de fase entre los haces de prueba y de referencia en el Interferómetro de Fizeau construido, está dada por la suma de las expresiones 1.40, 1.41 y  $\pi$ :

$$\delta = \frac{4\pi}{\lambda}d + \frac{4\pi}{\lambda}x \tan(\alpha) + \pi \quad (1.42)$$

Donde  $d$  es la separación entre la placa interferométrica y la superficie bajo prueba,  $x \tan(\alpha)$  es una distancia adicional entra las placas por la posible inclinación entre ellas y  $\pi$  es el cambio de fase relativo por la reflexión. La figura 1.8 muestra un esquema con los parámetros mencionados.

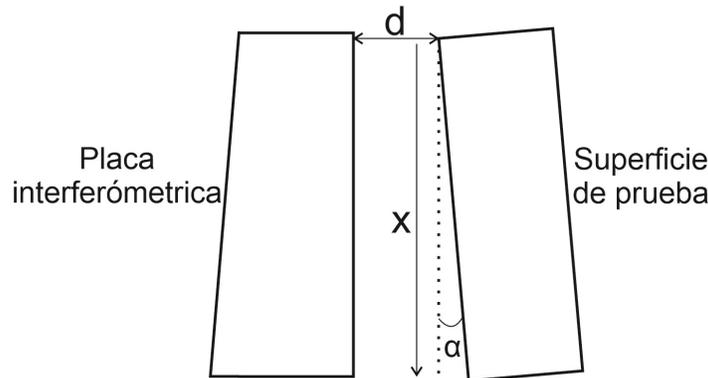


Figura 1.8: Cálculo de la diferencia de fase total en el Interferómetro de Fizeau.

### 1.3. Interferómetro de desplazamiento lateral

Es importante explicar el funcionamiento del interferómetro de desplazamiento lateral, ya que se utilizó para colimar la luz en el Interferómetro de Fizeau construido.

A diferencia del Interferómetro de Fizeau, el cual compara un frente de onda de referencia con uno bajo prueba, el interferómetro de desplazamiento lateral compara dos frentes de onda idénticos producidos por el mismo plano óptico, trasladando uno respecto al otro cuando se desplaza la lente colimadora. En la figura 1.9 se muestra el esquema del interferómetro de desplazamiento lateral de Murty, cuya configuración fue la que se usó en el laboratorio.

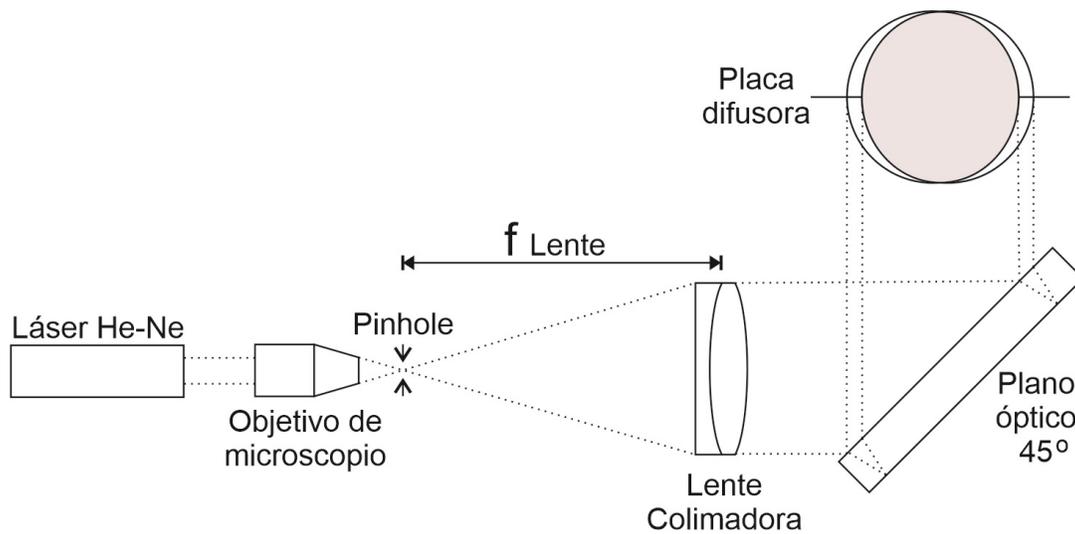


Figura 1.9: Esquema Interferómetro de desplazamiento lateral de Murty.

Estos interferómetros se usan para determinar la calidad de lentes y sistemas ópticos, como aberración esférica, coma y astigmatismo. En este caso fue usado para colimar la luz.

El interferómetro utilizado es de la marca Thorlabs, el cual consiste en un plano óptico de 13 *mm* de grosor montado a 45° y una placa difusora con una línea de referencia reglada en el centro.

Si la lente está colimando la luz que pasa a través de ella, los frentes de onda tendrán una diferencia de trayectoria uniforme entre ellos; y en la placa difusora será observado un patrón de interferencia de franjas paralelas a una línea de referencia.

En la figura 1.10 se observa el patrón de interferencia obtenido al colimar la luz, esto querrá decir que la lente se encuentra separada de la fuente puntual, una distancia igual a su distancia focal.

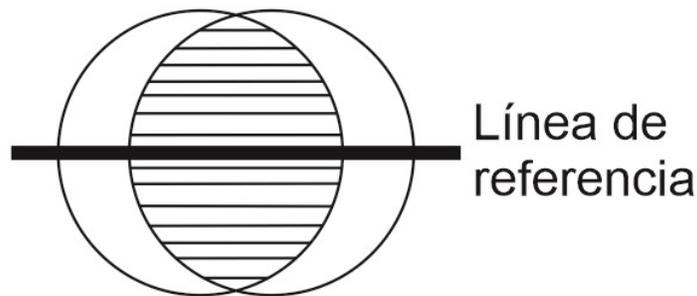


Figura 1.10: Patrón de interferencia con luz colimada.

Si la lente no está colimando, se observan patrones de interferencia como los mostrados en la figura 1.11.

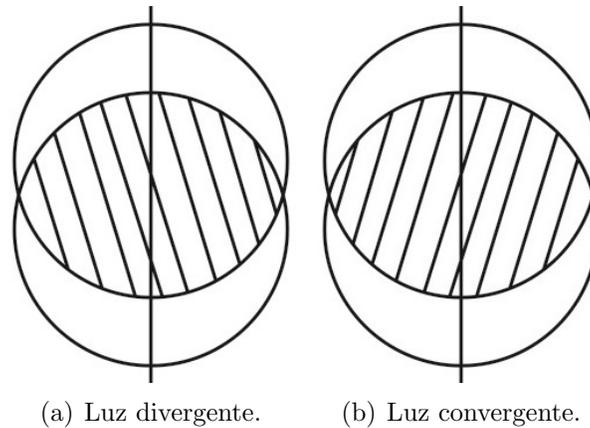


Figura 1.11: Patrón de interferencia con luz no colimada.

## 1.4. Construcción del Interferómetro de Fizeau

En el Apéndice A se encuentra una tabla con los elementos utilizados para la construcción del interferómetro, así como los precios, marcas y modelos de cada uno de ellos.

En esta sección, se muestran los pasos que se siguieron para construir el Interferómetro de Fizeau, así como las consideraciones de cada uno de los elementos que lo conforman. El interferómetro fue montado en una mesa óptica.

### Paso 1 Láser

Algunos interferómetros requieren una fuente puntual de luz monocromática, lo cual hace conveniente usar un láser como fuente de iluminación, teniendo también la ventaja de ser luz tanto temporal como espacialmente coherente. Algunos láseres utilizados comúnmente para interferometría son de Helio-Neón, de argón, de rubí, Nd-YAG, entre otros.

La fuente de luz utilizada en el Interferómetro de Fizeau construido es un láser de Helio-Neón (He-Ne), pues estos láseres producen un haz gaussiano de buena calidad y proporcionan una salida visible continua; operan a una longitud de onda de 633  $nm$  aproximadamente, aunque también los hay de otras longitudes de onda visibles e infrarrojas.

Se requiere que la fuente sea monocromática o cuasi-monocromática, porque de esta manera tiene una longitud de coherencia larga. Por esta razón, el láser de He-Ne, es la fuente de luz más usada en interferometría.

- (a) Se colocó el láser de tal manera que el haz permaneciera paralelo a la mesa óptica, y siempre en la misma dirección.
- (b) Primero se colocó la montura del láser de manera paralela y perpendicular a la mesa.

- (c) Para asegurar que el haz permaneció paralelo y además siguió una línea de puntos de la mesa, se usaron un par de retículas, las cuales fueron la referencia para el resto de la alineación.

El interés porque el haz haya permanecido alineado con una línea de puntos de la mesa es simplemente para facilitar el trabajo de alineación, pues las monturas de los demás elementos ópticos se atornillan a la mesa, quedando centradas en un punto de la mesa.

## Paso 2 Divisor de haz

Los divisores de haz son dispositivos ópticos que reflejan y transmiten parcialmente un haz, están hechos de tal manera que una cara refleje un porcentaje de la luz por medio de un revestimiento parcialmente reflectante. Si es una placa, la otra cara no debe reflejar la luz, para lograr esto, se puede utilizar un revestimiento antirreflejos multicapa en la segunda cara.

Los divisores de haz, se pueden hacer con películas extremadamente delgadas de metal, pero estas tienen que ser casi plana en el rango de la luz de onda visible para que el haz reflejado y transmitido conserve su color.

Para el interferómetro se utilizó un divisor de haz con una película dieléctrica de silicio, el haz conserva sus colores originales solo si la reflectividad es constante para todo el espectro visible.

- (a) Se colocó el divisor de haz a  $45^\circ$  con respecto al frente de onda del haz del láser, dejando espacio suficiente entre el divisor y el láser, para poner el filtro espacial.
- (b) Se tuvo que reubicar el láser, de tal manera que el haz saliente del divisor siguiera la misma línea de puntos de la mesa, mencionada en el paso 1. A continuación, se muestra el cálculo que se hizo para determinar la distancia lateral que se movió el láser.

$$\overline{AB} \cos \theta_t = t \rightarrow \overline{AB} = \frac{t}{\cos \theta_t}$$

$$d = \sin(\theta_i - \theta_t) \overline{AB} \rightarrow d = \frac{t \sin(\theta_i - \theta_t)}{\cos \theta_t}$$

El divisor de haz está hecho de vidrio  $N - BK7$  el cual tiene un índice de refracción de 1,673 a una longitud de onda de 632.8 nm (longitud de onda del láser). Si el haz incide a  $45^\circ$  en el divisor de haz, por la ley de Snell se sabe que el ángulo de transmisión es  $\theta_t = 24,83^\circ$ . El espesor del divisor es de 11.66 mm, entonces la distancia  $d$  es:

$$d = \frac{11,66 \text{ mm} \sin(45^\circ - 24,83^\circ)}{\cos(24,83^\circ)} = 3,93 \text{ mm}$$

Se sabe que el ángulo con el que sale el haz del divisor es igual al ángulo de incidencia.

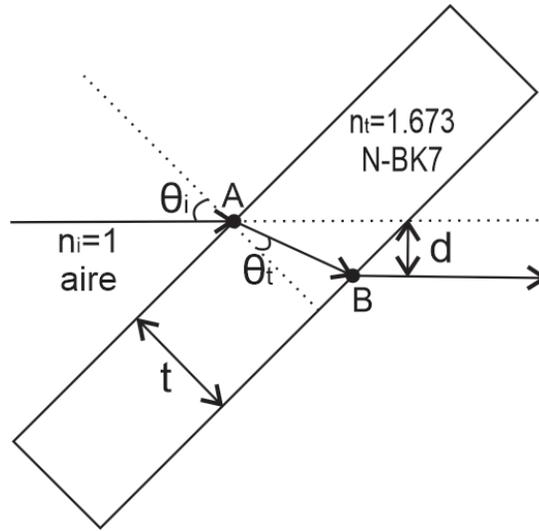


Figura 1.12: Cálculo del desplazamiento del haz generado por el divisor.

$$n_i \sin \theta_i = n_i \sin \theta_i$$

$$\theta_t = \theta_i'$$

$$n_t \sin \theta_i' = n_i \sin \theta_t'$$

$$\theta_i = \theta_t'$$

### Paso 3 Filtraje espacial

El filtro espacial está formado por un objetivo de microscopio que enfoca al haz para producir una fuente puntual, y una abertura circular (*pinhole*) que bloquea los anillos secundarios generados por difracción al haber enfocar el haz. El filtraje espacial es un sistema usado comúnmente para "limpiar" el haz que sale del láser.

Un *pinhole* colocado justo en el centro del eje del haz, bloquea los anillos de ruido dejando pasar únicamente el *spot* central donde se concentra la mayor parte de la energía del láser. El diámetro del *pinhole* está relacionado con la distancia focal del objetivo de microscopio  $F$ , el radio del haz del láser  $R$  y con la longitud de onda del láser  $\lambda$ , de la siguiente manera: [2]

$$D_{pinhole} = 1,22 \frac{\lambda F}{R} \quad (1.43)$$

$$D_{pinhole} = 1,22 \frac{(632,8 \text{ nm})(4,65 \text{ mm})}{(0,27 \text{ mm})} = 13,3 \mu\text{m}$$

El *pinhole* que se usó tiene un diámetro de  $15 \mu\text{m}$ .

- Se colocó el filtraje espacial entre el láser y el divisor de haz.
- Inicialmente se puso el *pinhole* centrado en el eje del haz y a la distancia focal del objetivo de microscopio.

- (c) Con ayuda de los tornillos de ajuste de la montura del *pinhole*, se encontró la posición más adecuada del *pinhole*, de manera tal que se produjo un spot centrado y con la mayor intensidad posible.
- (d) Se comprobó que la altura y dirección del rayo fuese la misma.

#### Paso 4 Lente colimadora

Al haber expandido el haz con el objetivo de microscopio, es necesario colimar la luz. La colimación reduce la divergencia en la dirección del haz, haciéndolo perceptible aun a distancias grandes. En el interferómetro, es necesario que las superficies de pruebas y de referencia estén iluminadas con gran eficiencia.

Un haz de luz está colimado si los rayos son paralelos entre sí, de modo que el flujo de energía es unidireccional. Se puede obtener luz colimada usando una lente convergente de tal forma que la fuente puntual generada con el sistema de filtraje espacial se localice en el foco anterior de la lente. En el interferómetro construido se usó un doblete acromático para reducir la aberración esférica y obtener un mayor grado de colimación.

Un doblete acromático, son dos lentes, una positiva y una negativa, de diferente tipo de vidrio, puestas en contacto, como se muestra en la figura 1.13.

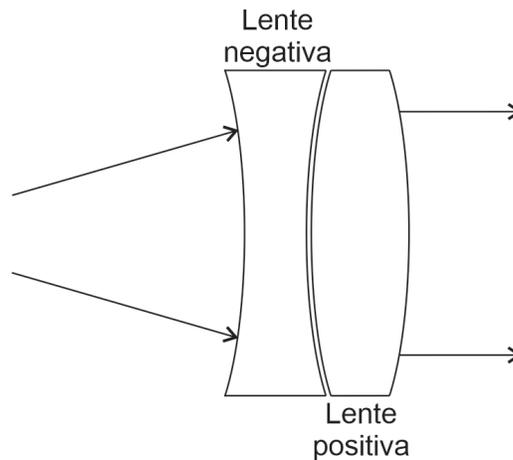


Figura 1.13: Doblete acromático.

- (a) Se colocó la lente colimadora a 500 *mm* del *pinhole* (distancia focal efectiva del doblete).
- (b) Para asegurar que el doblete se encontraba en la posición adecuada, se usó el interferómetro de desplazamiento lateral descrito en la sección 1.3, donde además se menciona su funcionamiento. El patrón de interferencia observado con el interferómetro de desplazamiento lateral se observa en la figura 1.14. Cuando las líneas del patrón de interferencia son paralelas a la línea de referencia reglada localizada en el centro de la placa difusora, entonces la luz que sale del doblete esta colimada.

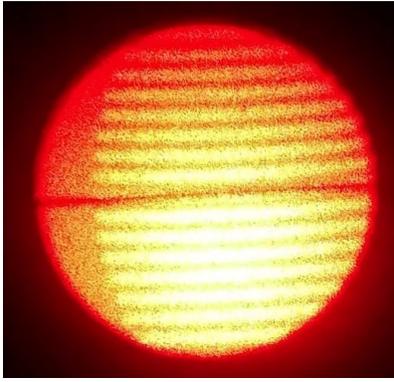


Figura 1.14: Patrón de interferencia observado en el interferómetro de desplazamiento lateral.

### Paso 5 Placa interferométrica

Se necesita comparar el frente de onda de la superficie bajo prueba con uno de referencia que garantice que las aberraciones medidas sean resultado única y exclusivamente de la pieza óptica a probar. Por lo que es importante tener una superficie de referencia con una calidad óptica alta.

La placa interferométrica usada tiene una planitud de  $\lambda/10$ , garantizada por el fabricante. Los patrones de franjas de la misma placa son eliminados gracias a una ligera cuña entre las caras.

- (a) Se ubicó la placa interferométrica después de la lente colimadora.
- (b) Fue esta superficie la que se montó sobre la platina de desplazamiento, de tal manera que el barrido siguió la dirección del eje óptico del haz.

### Paso 6 Superficie bajo prueba

El Interferómetro de Fizeau puede comprobar el paralelismo de las superficies y verificar la homogeneidad de las piezas ópticas. De igual manera podría probar superficies cóncavas y convexas usando una lente convergente, pero se necesita otro tipo de arreglo. [3]

La superficie que se probó fue fabricada en el Laboratorio Universitario de Fabricación de Equipos Ópticos (LUFABEO) del ICAT, a partir de un vidrio común de ventana, es una pieza redonda con una pulgada de diámetro, no fue pulida. Para evitar reflexiones de la cara posterior del vidrio, esta fue pintada con barniz.

- (a) Este componente se colocó después de la placa interferométrica, de esta manera, a medida que la superficie de referencia se desplaza, esta se acerca o se aleja de la superficie de prueba.
- (b) Quedo centrada en el eje óptico del haz.

## Paso 7 Cámara CMOS

Para poder observar el patrón de interferencia y posteriormente almacenar una serie de interferogramas, fue necesario usar una cámara de video de semiconductor complementario de óxido metálico (CMOS *Complementary Metal Oxide Semiconductor*).

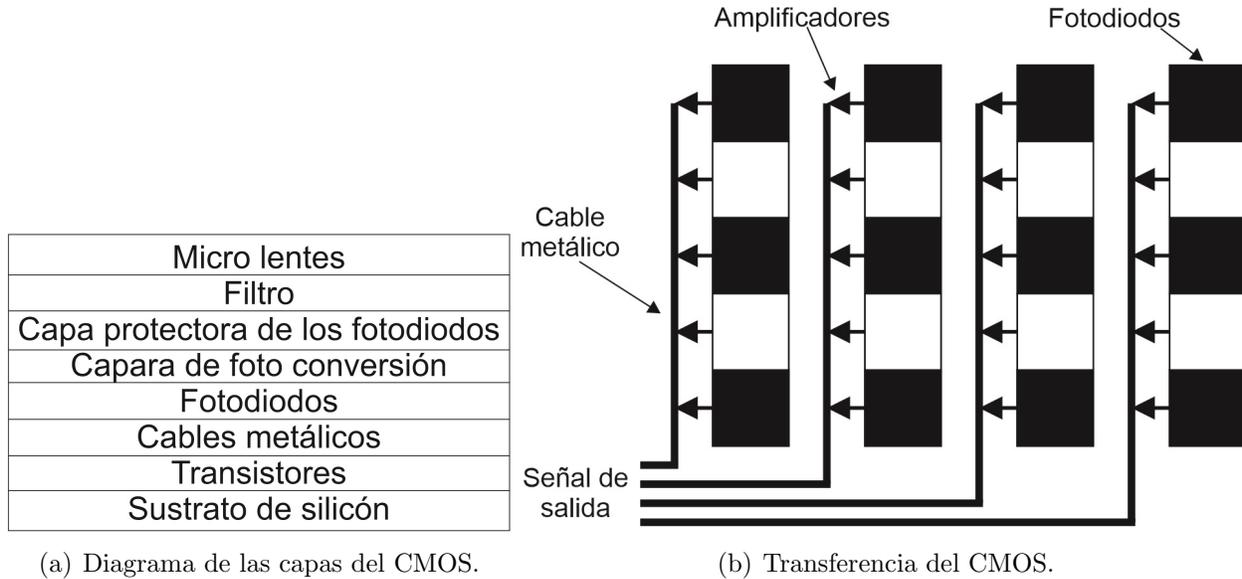


Figura 1.15: Semiconductor complementario de óxido metálico.

Los CMOS están formados por fotositos (cavidades con fotosensores, suelen tener micro lentes para capturar mejor la luz a distintos ángulos de incidencia), uno para cada píxel, los cuales producen una corriente eléctrica que varía dependiendo de la intensidad de luz recibida. Los CMOS tienen alta resolución, velocidad y sensibilidad. La luz primero pasa por los micro lentes, luego por una sección de amplificadores que aumenta la señal y por último se tiene una sección donde cada uno de los pixeles se convierte de analógico a digital, es aquí cuando ya se tiene una imagen digitalizada.

- (a) Se colocó la cámara de tal manera que los frentes de onda de prueba y referencia, una vez que sean reflejados por el divisor de haz, lleguen paralelos a la cámara CMOS.

En la figura 1.16, se muestra como quedó finalmente el Interferómetro de Fizeau ya montado.

## 1.5. Captura de los interferogramas

La luz del LUFABEO debe permanecer apagada en todo momento, para poder apreciar el patrón de interferencia.

El primer paso para obtener los interferogramas es comprobar que los frentes de onda de prueba y de referencia estén sobrepuestos formando un patrón de interferencia. Se movieron los tornillos de ajuste de la montura de la superficie de prueba, para conseguir un patrón de interferencia centrado y con el menor número de franjas. Primero se consiguió un interferograma como el que se muestra

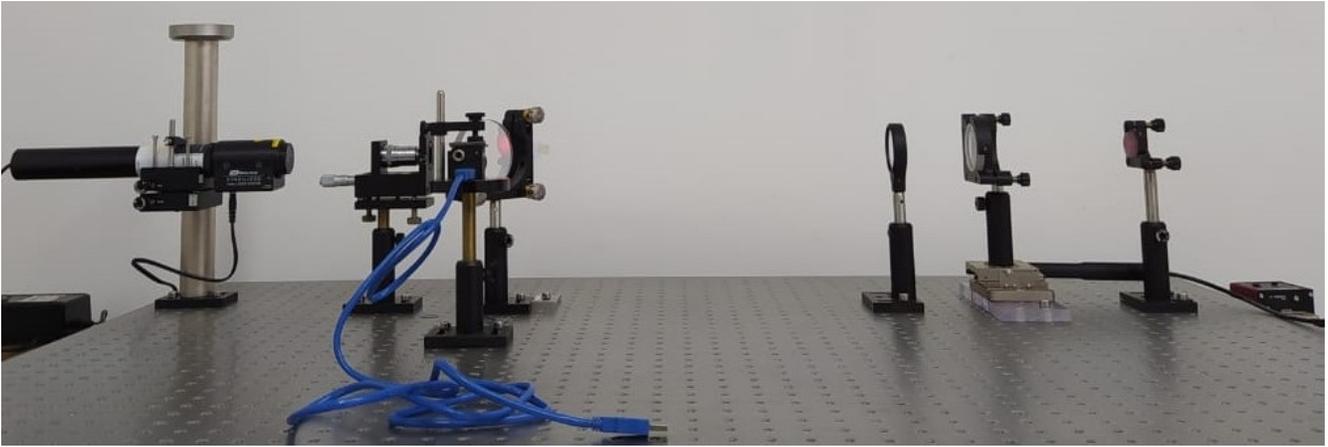


Figura 1.16: Interferómetro de Fizeau construido.

en la figura 1.17, el cual fue tomado con la cámara CMOS.

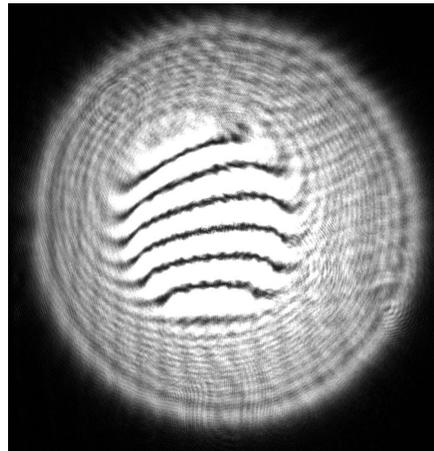


Figura 1.17: Patrón de interferencia.

El siguiente paso fue ajustar tanto la posición de la cámara CMOS, como su configuración.

- Como se pudo observar en la figura 1.17, la placa interferométrica es más grande que la superficie de prueba, la información que se requiere debe provenir de la superficie de prueba, es decir, el patrón de interferencia debe cubrir en su totalidad al sensor de la cámara.
- El brillo del láser satura la cámara, para evitar esto, se configura la ganancia y el tiempo de exposición de la cámara. La ganancia no debe ser automática, debe ser manejable y nula. No hay un tiempo de exposición exacto, dependerá de las condiciones cada vez que se use el interferómetro, únicamente debe verificarse que la cámara no se esté saturando.
- Cuanto mayor es la tasa de muestreo, la calidad del vídeo es mayor, sin embargo los interferogramas son imágenes sin movimiento, por lo que es conveniente una tasa de muestreo baja, de esta manera hay menos cuadros por segundo y más tiempo para la integración de la imagen.

Uno de los pasos más importantes para la adquisición de los interferogramas, es la manera en cómo son capturados por la cámara. Como se explica en el capítulo 3, el frente de onda de la superficie bajo prueba se encuentra codificado en el patrón de intensidad de los interferogramas. Es aquí donde radica la importancia del porque el brillo del patrón no debe saturar la cámara.

Otro detalle importante es considerar el número de franjas que mostrara el interferograma. Si las franjas tienen una separación muy grande entre ellas, los puntos muestreados estarán de igual manera muy separados unos de otros, dejando zonas sin información. Al tener pocas franjas, los cambios de la diferencia de camino óptico causan variaciones de las intensidades de las franjas.

Por otra parte, si las franjas se encuentran muy cercanas unas con la otras, habrá una alta densidad de puntos muestreados. Si se tienen muchas franjas, esta vez, los cambios de la diferencia de camino óptico provocan desplazamiento de las franjas.

Al usar un interferómetro de cambio de fase, se aconseja alinearlo con pocas franjas, de esta manera se minimizan los errores de seguimiento. Además, la técnica de Interferometría de Desplazamiento de Fase, descrita en el capítulo 3, recuperar la fase del frente de onda, gracias a las variaciones de intensidad en el patrón de interferencia.

Para aplicar la técnica Interferometría de Desplazamiento de Fase, se capturaron 10 interferogramas con un paso de  $10 \mu m$ .

La captura de los interferogramas se hace de manera automática con el sistema de control desarrollado, descrito en el capítulo 2.

Los interferogramas fueron guardados en formato *.bmp* y *.pgm* con un tamaño de  $1280 \times 1024$  pixeles.

En la figura 1.18 se puede observar uno de los interferogramas obtenidos con el Interferómetro de Fizeau.

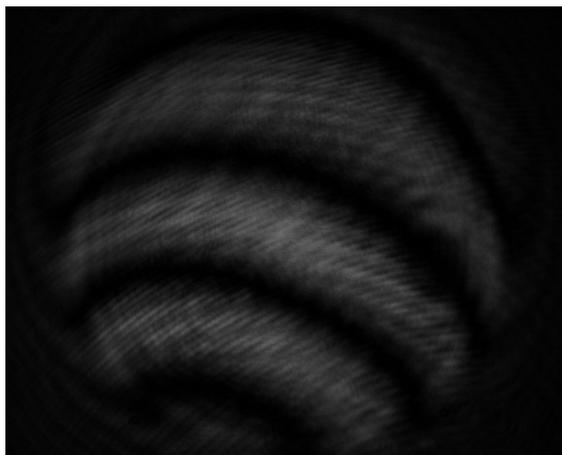


Figura 1.18: Interferograma obtenido con el interferómetro de Fizeau.

# Capítulo 2

## Sistema de Control del Interferómetro de Fizeau

A continuación, son descritas las fases del desarrollo del sistema de adquisición de los interferogramas, las cuales contiene información elemental para la implementación del software.

### 2.1. Antecedentes

El Laboratorio Universitario de Fabricación de Equipos Ópticos (LAFUBEO) del Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología, se encuentra desarrollando instrumentación óptica con la finalidad de medir la forma de superficies ópticas planas, con un diámetro de hasta dos pulgadas, y una desviación del valor cuadrático medio (RMS) de aproximadamente un cuarto de la longitud de onda de la luz en el visible. La medida RMS es una forma de determinar las irregularidades de una superficie con respecto a una forma ideal plana.

La calidad de las superficies ópticas depende tanto del vidrio como del pulido de la superficie. El LUFABEO cuenta con una máquina pulidora de control numérico que permite fabricar superficies con calidad óptica, desde baja hasta alta, para ello se requiere medir la forma de la superficie para poder controlar el pulido que realiza la máquina.

Se propuso construir un Interferómetro de Fizeau con el objetivo de poder medir superficies relativamente planas. La forma de la superficie se determina con una técnica llamada Interferometría de Desplazamiento de Fase descrita en el capítulo 3. Esta técnica requiere una serie de interferogramas.

Se sabe que en cualquier instrumento de medición hay errores presentes. En el Interferómetro de Fizeau construido, se presentaban diversos factores que introducían errores en los interferogramas:

- (a) Factores ambientales.

El LUFABEO (lugar donde se encuentra el Interferómetro de Fizeau construido), está ubicado a lado de un taller mecánico, lo cual obviamente introduce vibraciones y turbulencias.

(b) Defectos en la construcción del instrumento.

Aunque el proceso de construcción del interferómetro fue muy minucioso, los errores debido a la alineación se hicieron evidentes al capturar los interferogramas, pues se descubrió que la placa interferométrica y la superficie bajo prueba no eran paralelas entre sí, sino que había un ángulo de inclinación entre ellas.

(c) Proceso de captura de los datos.

En un principio los interferogramas era capturados de manera manual, por la persona que operaba el interferómetro. Para capturar los interferogramas se usaban dos softwares por separado, 1) Kinesis, controlaba el motor el cual desplaza la platina para producir el cambio de fase, y 2) SpinView, manejaba la configuración de la cámara CMOS y guardaba los interferogramas capturados.

Se usaban dos softwares distintos porque eran los que proporcionaban los fabricantes, tanto del motor como de la cámara, para el manejo de sus dispositivos.

Además de las vibraciones mencionadas en el inciso (a), la captura de los interferogramas de forma manual, añadía más vibraciones, ya que, cada que se hacía clic sobre en la computadora (la cual se encuentra en la misma mesa donde fue montado el interferómetro), el patrón de interferencia se movía. La ubicación de la computadora se debe a que tanto el motor que desplaza la platina como la cámara CMOS, se conectan por un cable USB a la computadora, para poder ser manejados.

En resumen, los inconvenientes presentes en la captura de los interferogramas y los motivos principales por los cuales se desarrolló un sistema para la adquisición de estos son los siguientes:

- El software de cada uno de los elementos se encuentra por separado y hace tedioso estar cambiando entre ventanas para controlar cada dispositivo.
- Es muy tardado adquirir una serie de interferogramas, alrededor de 10 minutos, por cada secuencia de 10 fotos. Tomar en cuenta que, para el análisis de la superficie bajo prueba a veces es necesario más de una serie de datos.
- Se sabe que un interferómetro es un instrumento bastante sensible. Tomando en cuenta que para guardar un único interferograma, se hace clic en la computadora como mínimo 4 veces (mover motor, tomar foto, nombrar foto y guardar foto), ahora con 10 interferogramas, estar haciendo clic en la computadora hacía que la mesa óptica vibrara todo el tiempo.

### 2.1.1. Kinesis

Todo el sistema de desplazamiento (motor, platina y actuador) es de un mismo fabricante, el cual ofrece dos softwares distintos para manejar sus productos, APT y Kinesis. Si bien, ambos softwares funcionan perfectamente, se decidió trabajar con Kinesis porque es el software desarrollado por el fabricante, a diferencia de que APT que es un software heredado.

Kinesis de Thorlabs, tiene controladores .NET que pueden ser utilizados por desarrolladores que trabajen con los lenguajes C#, Visual Basic, LabVIEW o cualquier otro lenguaje compatible

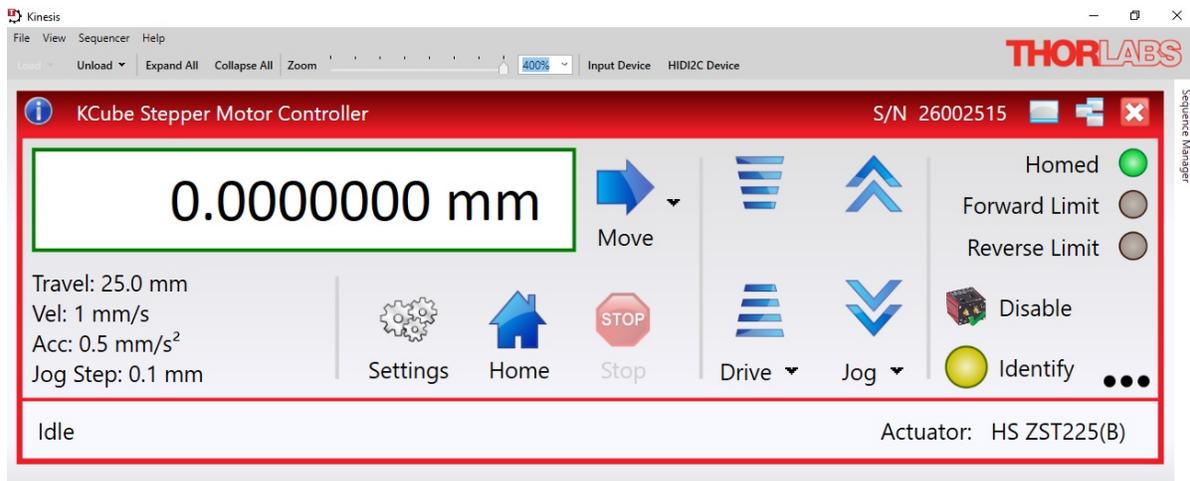


Figura 2.1: Interfaz Kinesis para controlar el motor.

con .NET para crear aplicaciones personalizadas. Todos los controladores son compatibles para interfaces gráficas de usuario e interfaces de programación.

Junto con el software Kinesis, vienen incluidas bibliotecas DLL disponibles para aplicaciones.

Todas estas herramientas, hacen que el usuario pueda mezclar y combinar fácilmente cualquiera de los controladores en una sola aplicación. Además, Thorlabs tiene disponible una variedad de tutoriales en vídeo y guías, que explican al desarrollador el funcionamiento del software.

### 2.1.2. SpinView

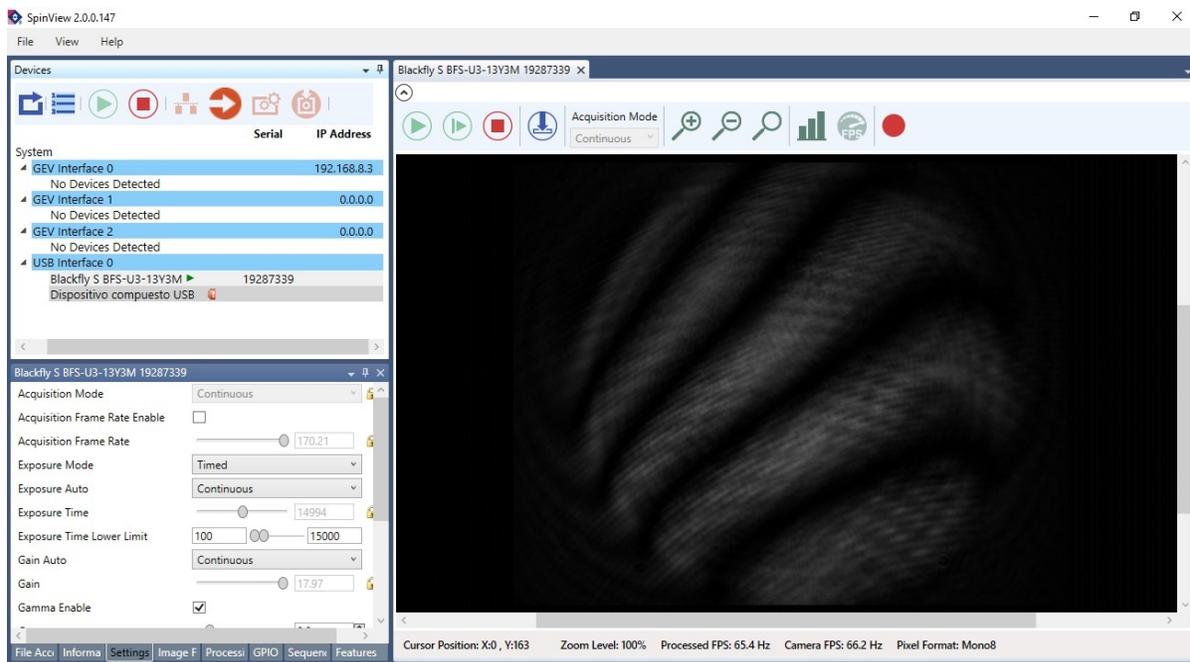


Figura 2.2: Interfaz SpinView para controlar la cámara CMOS.

Spinnaker SDK es una biblioteca de interfaz de programación de aplicaciones. En otras palabras, es un conjunto de rutinas que provee acceso a funciones de un software determinado, con el fin de ser utilizado por desarrolladores.

SpinView es la interfaz gráfica de usuario de Spinnaker SDK, la cual soporta, entre otros dispositivos, a FLIR USB3, la cámara CMOS monocromática utilizada para capturar los interferogramas.

## 2.2. Requerimientos del sistema

Antes de desarrollar el sistema fue necesario saber cuál era el propósito para construirlo, que tareas se debían cumplir y a que problemas se deseaba dar solución. Como ya se explicó en la sección 2.1, había 3 inconvenientes, que se resolvieron con el sistema desarrollado:

- (a) El sistema de manejo de cada uno de los elementos se encuentra por separado.
- (b) El tiempo para adquirir manualmente una serie de interferogramas es alto.
- (c) Capturar de forma automática los interferogramas, hace que el operador genere menos vibración al interferómetro, evitando hacer varias veces clic a la computadora que se encuentra sobre la mesa óptica.

Los puntos siguientes establecen los requerimientos generales del sistema:

- Se desea implementar un único sistema que integre los controles de la cámara y el motor, adicionando el autoguardado de los interferogramas.
- Se debe automatizar la adquisición de una serie de interferogramas, para que el operador ejecute la orden en un solo clic.
- Autoguardado de los interferogramas de manera ordenada.
- Los interferogramas guardados, deben estar disponibles para ser visualizados.
- La interfaz de usuario del sistema de control debe ser amigable para el usuario e intuitiva para facilitar su uso.
- El sistema debe estar disponible para una posible expansión, implementando nuevas tareas en una segunda versión.

Además, se desea que haya documentación disponible para el operador del sistema, con el fin de aprender a usar el software, resolver dudas y poder dar solución a problemas. Dicha documentación se encuentra disponible en el Apéndice B.

## 2.3. Diseño

Ya sabiendo que requiere el sistema, es necesario describir las partes que van a conformarlo y la relación que existe entre ellas.

Tanto el motor como la cámara cuentan con muchas funciones que no son indispensables para el software, pues ni si quiera se requiere modificarlas o acceder a ellas para que el sistema trabaje correctamente y en algunos casos, hay funciones que no se usan. Por ello es necesario establecer primero los parámetros que si necesitan ser manejables y que no pueden ser imprescindibles.

Es importante mencionar que, si bien, lo que se maneja es el motor, lo que se mueve es la platina, gracias a que el motor controla un actuador que desplaza la platina.

A continuación, se enlistan las funciones indispensables para el sistema, tanto del motor como de la cámara.

### Controles del motor a pasos

- Número de serie del motor.
- Botón de prendido y apagado del motor.
- Velocidad y aceleración.
- Unidades del paso.
- Longitud del paso.
- Botón para mover la platina.
- Botón para la platina.
- Botón para llevar la platina a una posición inicial.
- Controles para una secuencia de movimientos.

### Controles de la cámara CMOS

- Selección de la cámara.
- Atributos y parámetros modificables.
- Botón para grabar.
- Botón para parar la cámara.
- Botón para tomar una captura.
- Panel para visualizar los datos capturados por la cámara.
- Botón para guardar una captura.
- Entradas para poner nombre y dirección a la captura al guardarla.

Así como fueron mencionadas las funciones de la cámara y el motor, también se enlistarán los controles a implementar para automatizar el proceso de adquisición de interferogramas.

## Controles de la adquisición automática de los interferogramas

- Nombre de pila de los interferogramas.
- Dirección de guardado.
- Longitud del paso.
- Número de interferogramas.
- Tiempo de espera entre cada iteración.
- Botón de inicio del proceso.

El nombre de pila del interferograma lo indica el operador, el sistema añade la terminación con el número del interferograma. En la sección 2.5 se muestra como el sistema completa el nombre.

### 2.3.1. Diseño estructural

Se desea que con el sistema sea posible manejar la cámara y el motor en conjunto, y además adquirir una serie de interferogramas de manera automática. Así que se estableció que el sistema contara con 3 ventanas:

**Ventana 1:** Controles e indicadores del motor.

**Ventana 2:** Controles e indicadores de la cámara.

**Ventana 3:** Controles e indicadores de la adquisición automáticamente de interferogramas.

En cada una de las secciones debe haber no solo controles, sino también indicadores. Estos últimos son terminales de salida que únicamente muestran información para ser visualizada por el usuario, es decir, son datos que no pueden ser modificados por el operador.

Ya se mencionaron los controles con los que cuenta cada sección, ahora se mencionan los indicadores de cada apartado.

#### Indicadores del motor a pasos

- Posición de la platina.
- Número de iteración (es diferente al indicador de la ventana de adquisición de los interferogramas).

#### Indicadores de la cámara CMOS

- Pantalla que muestra lo capturado por la cámara.
- Resolución de la imagen.
- Unidades y descripción de los atributos modificables.

## Indicadores de la adquisición automática de los interferogramas

- Pantalla que muestra los interferogramas.
- Número de iteración.
- LEDs que indican el estado del proceso.
- Resolución en pixeles del interferograma.

Los LEDs deben indicar al usuario el estado del proceso, 1) cuando el motor se está moviendo, 2) cuando la cámara captura el patrón de interferencia, 3) cuando el proceso ha finalizado.

En la figura 2.3 se muestra el diagrama de flujo del funcionamiento simplificado del sistema.

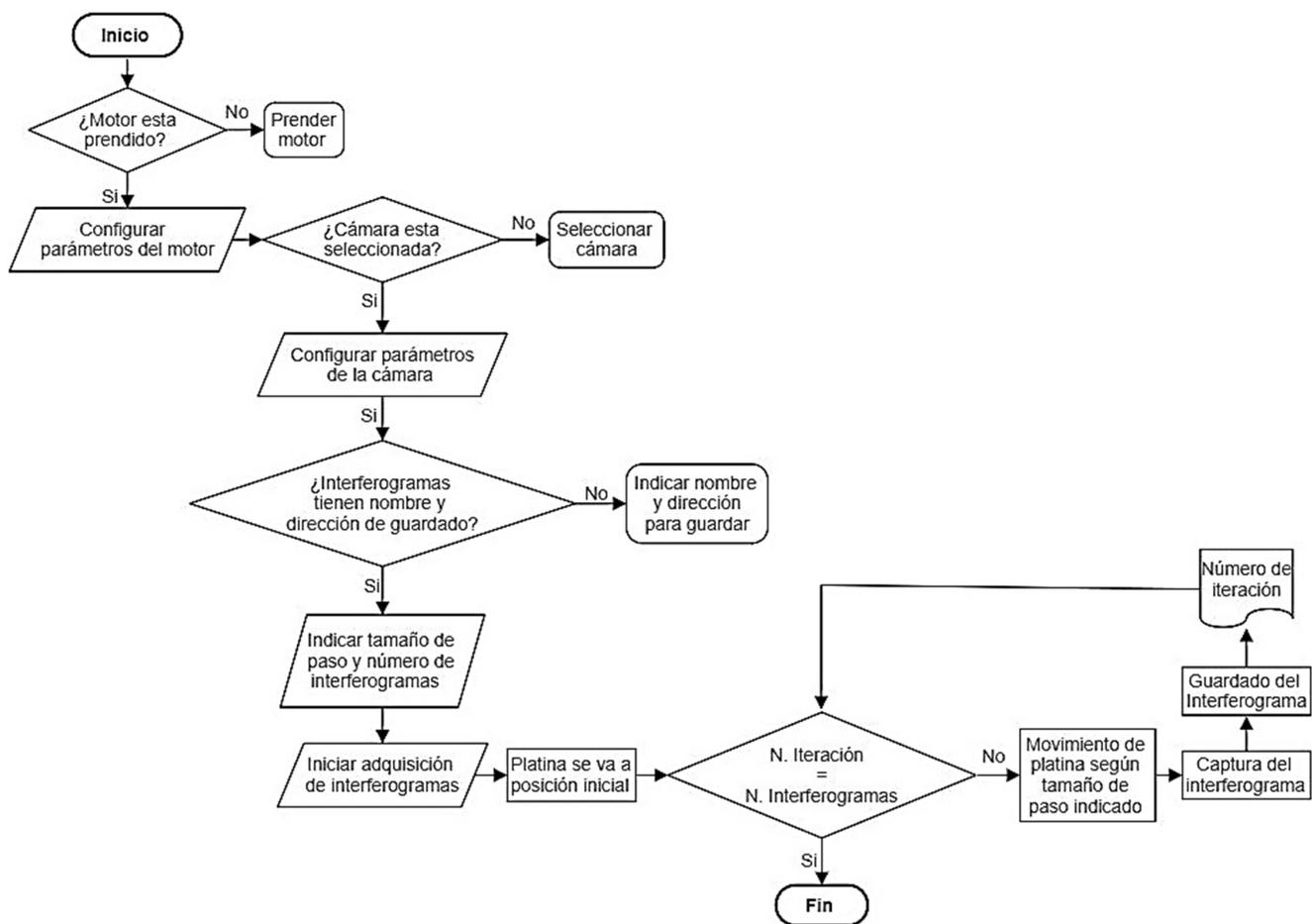


Figura 2.3: Diagrama de flujo del funcionamiento del sistema.

### 2.3.2. Diseño de la interfaz

Es conveniente que la interfaz gráfica para el usuario tenga jerarquía visual, lo cual facilita la navegación entre las distintas funciones del sistema.

Como ya se mencionó, el sistema cuenta con tres secciones, por lo que la interfaz tiene 3 paneles, uno para cada sección.

Se decidió que cada sección quedara en un panel diferente porque, tanto el motor como la cámara, cuentan con muchos controles e indicadores y ponerlos todos en una misma ventana obligaba a la interfaz a presentar terminales demasiado pequeñas para poder visualizarlas. Además de que la interfaz, visualmente, parecía tener todas las funciones amontonadas.

Es favorable que cada ventana sea similar a las otras, de esta manera el usuario puede habituarse más rápido a la interfaz. En un principio se pensó copiar el formato de las interfaces Kinesis y SpinView, pero estas eran muy diferentes entre sí.

Si el diseño resulta familiar en todos los paneles, facilita que el usuario pueda desplazarse por las diferentes pestañas. Por lo que se trabajó con un mismo color, formas iguales para los botones y un solo tipo de letra, tomando en cuenta siempre la jerarquía visual, sobre todo en el tamaño de los botones y letras.

En la figura 2.4 se presenta un boceto de las 3 ventanas de la interfaz gráfica.

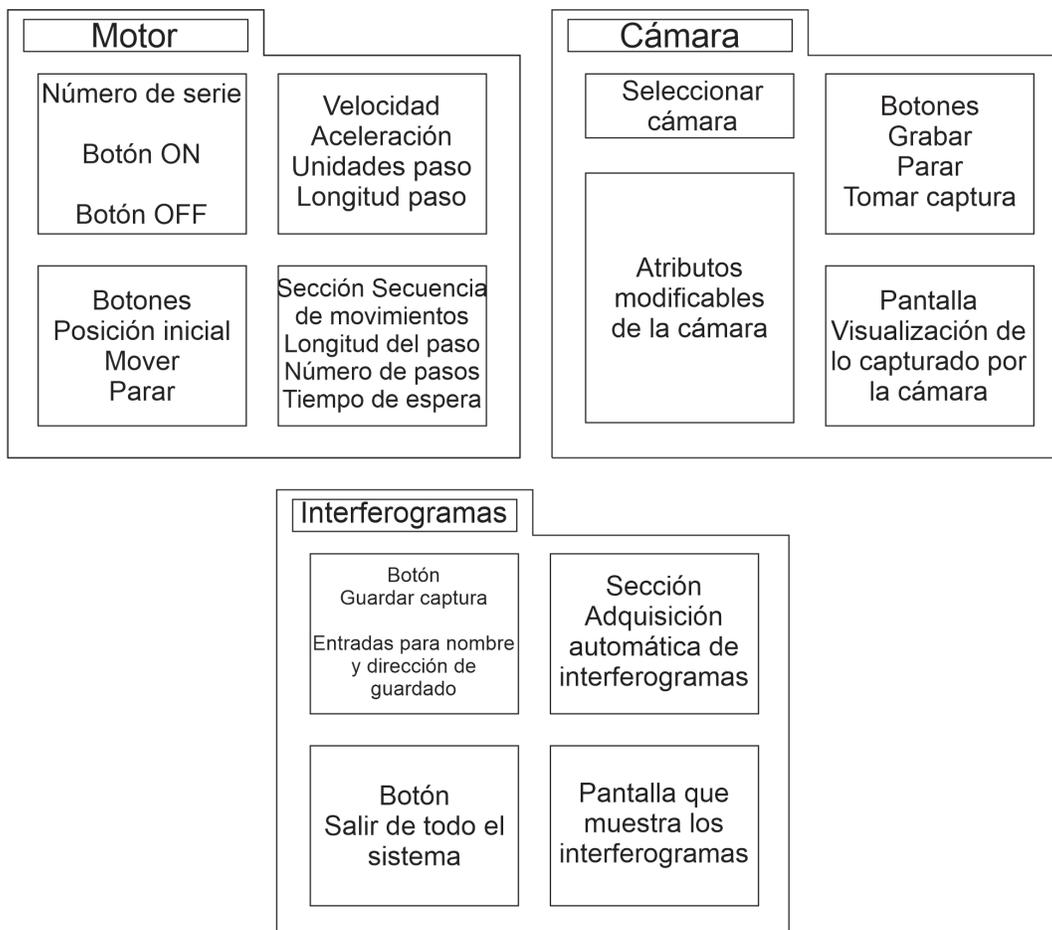


Figura 2.4: Boceto de las ventanas Motor, Cámara e Interferogramas de la interfaz gráfica del sistema.

## 2.4. Implementación

En esta fase de implementación se presenta la construcción, codificación e integración de todos los componentes del sistema. Antes de continuar es necesario indicar el software que se utilizó para desarrollar el sistema de control.

Como se mencionó en la sección 2.1.1, el software para controlar el motor que proporciona el fabricante cuenta con controladores .NET, los cuales pueden ser utilizados por desarrolladores que trabajen en los lenguajes C#, Visual Basic, LabVIEW o cualquier otro lenguaje compatible con .NET para crear aplicaciones personalizadas.

Se decidió implementar el sistema en LabVIEW porque es un software del que ya se tenían conocimientos previos, contando con la ventaja de que no se trabajaría desde cero, a diferencia de cualquier otro lenguaje.

Cabe mencionar que Thorlabs provee documentación que guía al usuario en el manejo de sus equipos desde otros softwares. De acuerdo con dicha documentación, LabVIEW puede comunicarse con controles .NET para manejar dispositivos de Thorlabs controlados con Kinesis.

Otra ventaja de trabajar con LabVIEW fue que, para el manejo de la cámara, ya se tenía un prototipo implementado en este software, el cual fue desarrollado en el grupo de óptica del LUFABEO.

### 2.4.1. LabVIEW, software utilizado como herramientas de desarrollo

LabVIEW es una plataforma con un entorno de programación visual gráfico (utiliza íconos, terminales y cables en lugar de texto), que permite crear aplicaciones que requieren pruebas, medidas, control y diseño, simulado o real y embebido. Este software facilita la integración de hardware de cualquier proveedor, con interfaces de usuario de ingeniería personalizadas.

Los programas desarrollados en LabVIEW se denominan Instrumentos Virtuales o VIs, pues su apariencia y operación imitan a los instrumentos físicos.

Al crear un VI, se abren dos ventanas, 1) Panel Frontal: que es la interfaz de usuario del instrumento virtual y 2) Diagrama de Bloques: donde se añade código usando representación gráfica para controlar los objetos del panel frontal. En la figura 2.5 se muestran las dos ventanas mencionadas y algunas de las terminales más usadas para la implementación del sistema desarrollado.

Cuando ya se ha desarrollado un VI, este puede ser usado en otro VI. A esto se le conoce como subVI y se llama desde el diagrama de bloques del nuevo instrumento virtual.

Los subVI son subrutinas y pueden ser llamados varias veces. Los subVI reciben y regresan datos al diagrama de bloques del VI donde fueron llamados.

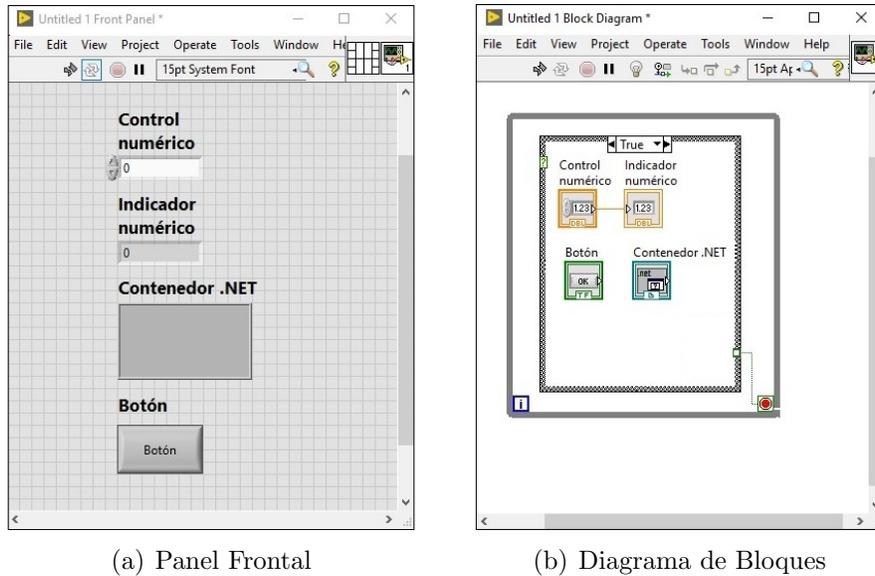


Figura 2.5: Entorno de programación en LabVIEW.

### 2.4.2. Aspectos a considerar en la implementación del sistema de control

Para poder desarrollar satisfactoriamente el sistema, se consideraron aspectos relevantes para la implementación, los cuales se mencionan a continuación.

- Para una parte del control de la cámara fueron usadas subVI, las cuales fueron desarrolladas en el grupo de óptica del LUFABEO. Estas subVI usan dos aplicaciones complementarias a LabVIEW. Al descargar estas aplicaciones, en el diagrama de bloques de LabVIEW, aparecen nuevas paletas de funciones. Las dos aplicaciones son las siguientes:
  - (a) Software *Vision Acquisition*: Permite adquirir, visualizar y guardar imágenes desde diversas cámaras estándares.
  - (b) Módulo *Vision Development*: Brinda una extensa biblioteca de funciones para desarrollar e implementar aplicaciones de visión artificial.
- Es posible crear aplicaciones en LabVIEW únicamente haciendo uso del panel frontal y el diagrama de bloques, sin necesidad de crear un proyecto. Sin embargo, para este sistema fue necesario trabajar con uno, ya que para el manejo del motor se usan .DLL, las cuales deben ser llamadas desde un proyecto. [4]

Las .DLL, las subVI y el proyecto deben estar en una misma carpeta. Esta carpeta es la que contiene al Sistema de Control del Interferómetro de Fizeau y fue nombrada *Software\_Fizeau*.

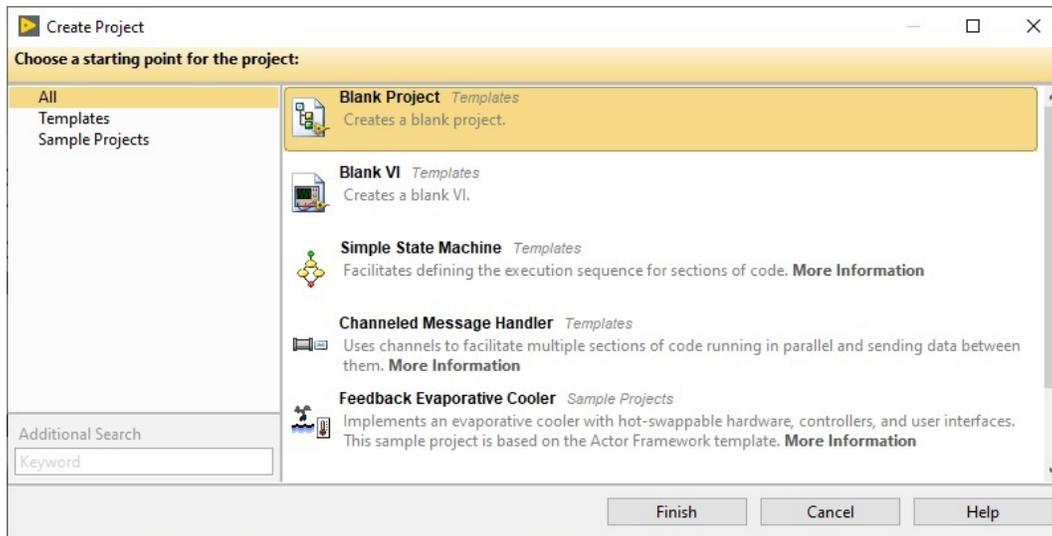


Figura 2.6: Ventana del software LabVIEW con las opciones para crear un proyecto o instrumentos virtuales.

## 2.5. Pruebas

En las figuras 2.7, 2.8 y 2.9, se muestra la interfaz gráfica del Sistema de Control del Interferómetro de Fizeau desarrollado, para el control del motor, la cámara y la adquisición de interferogramas respectivamente.

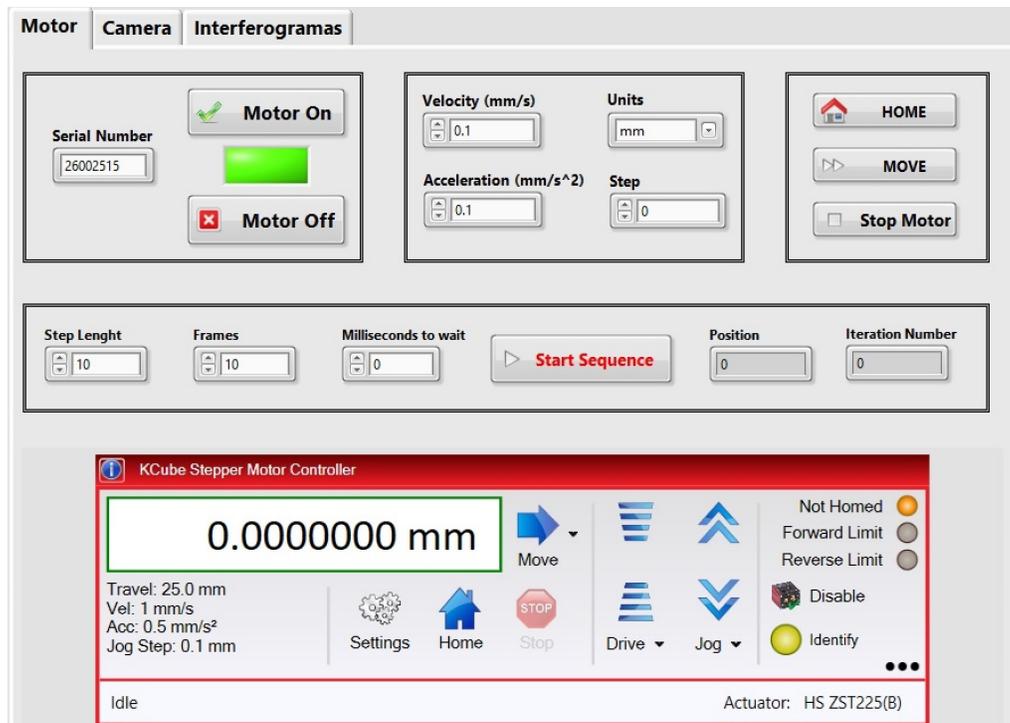


Figura 2.7: Ventana del control del motor.

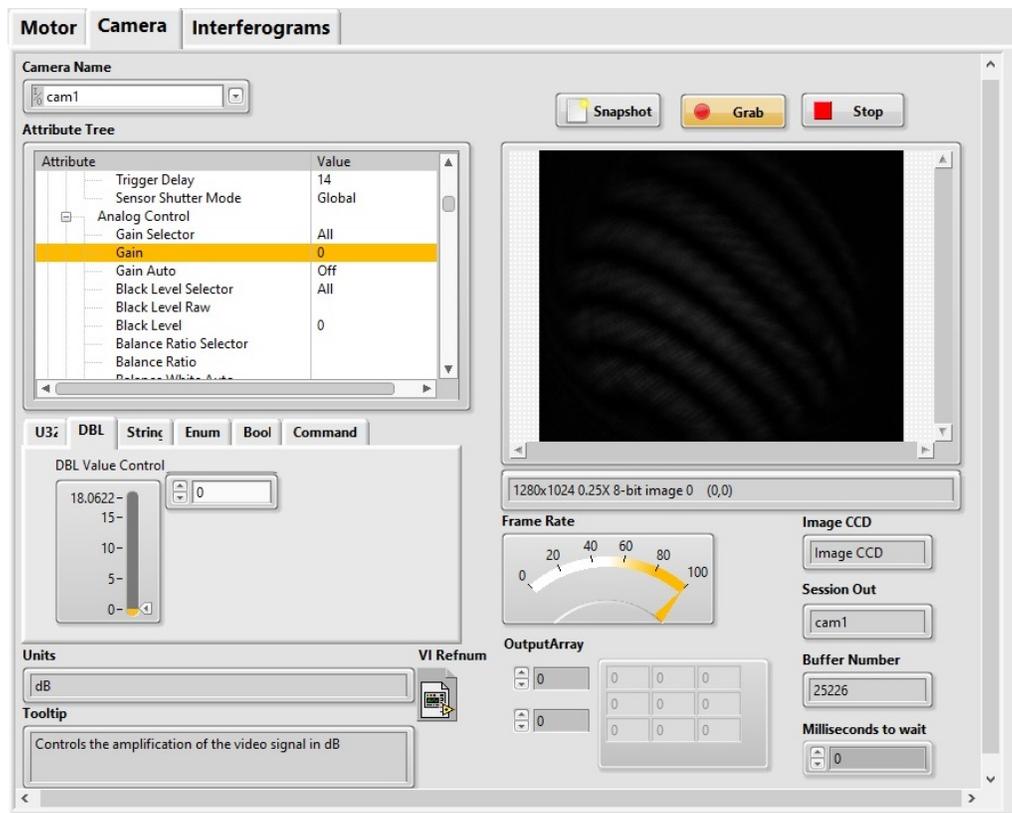


Figura 2.8: Ventana de la cámara.

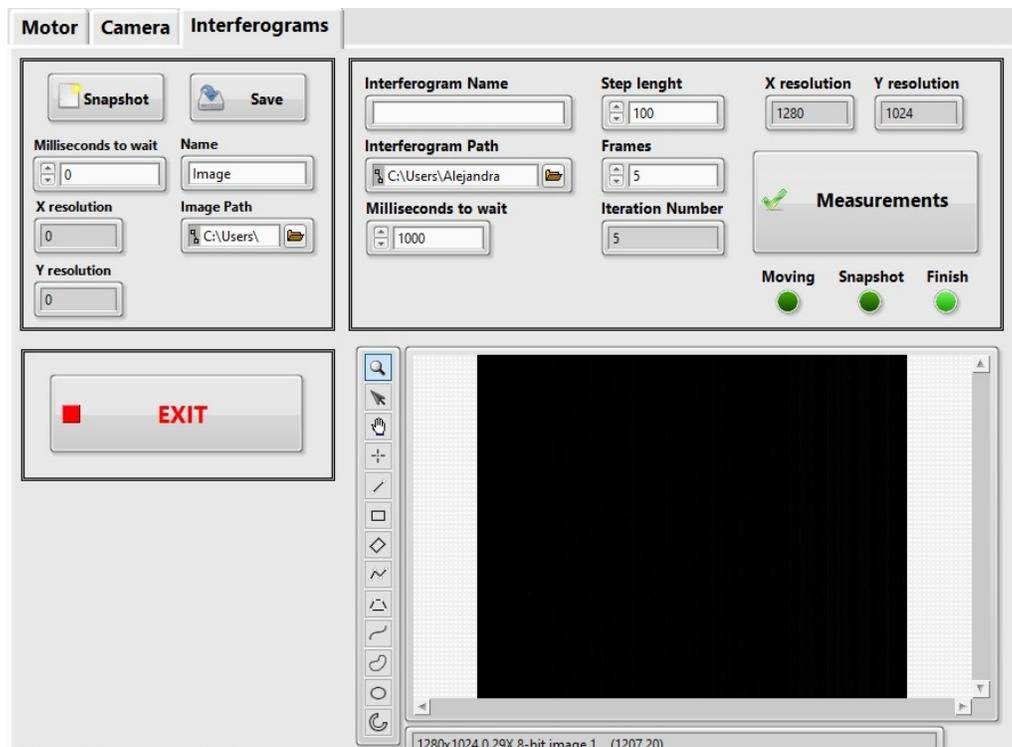


Figura 2.9: Ventana de la adquisición automática de interferogramas.

El sistema de control únicamente fue probado en la computadora donde se desarrolló. Se hizo un manual el cual se encuentra en el Apéndice B donde, además de guiar al operador en el funcionamiento del sistema, se mencionan las pautas a considerar para que el sistema pueda transportarse a cualquier computadora.

El sistema desarrollado cumple satisfactoriamente con todas las especificaciones mencionadas en la sección 2.2. A continuación, se describen los resultados de las pruebas de la aplicación.

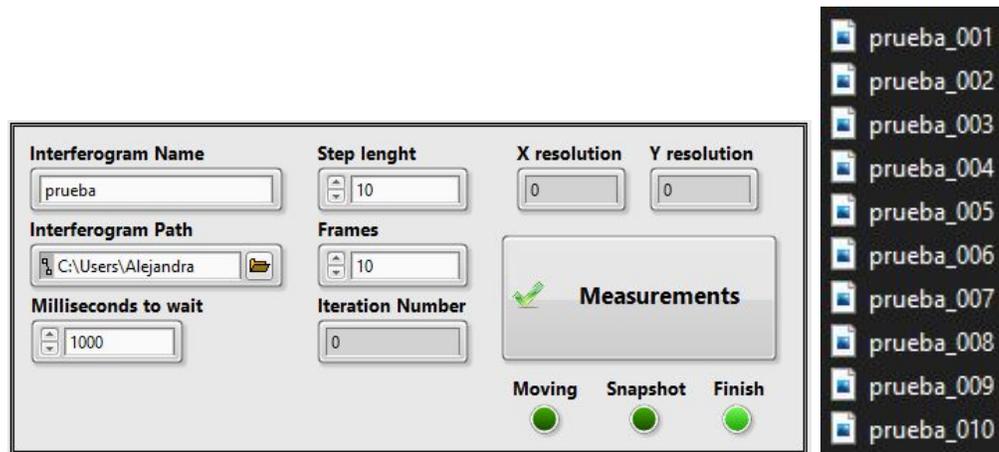
- Dentro de la interfaz gráfica se puede navegar entre tres ventanas, permitiendo que sea posible manejar el motor, la cámara y capturar interferogramas de manera automática, desde una misma aplicación. No obstante, el sistema permite control únicamente el motor aun si la cámara no se encuentra conectada y viceversa.
- En el proceso de adquisición de datos, el usuario primero establece los parámetros del motor y la cámara y posteriormente ejecuta la orden con un solo clic, lo cual disminuye el error provocado por el operador. Los pasos para capturar una serie de interferogramas son los siguientes:
  1. Verificar que el brillo del patrón de interferencia no esté saturando la cámara, esto se logra haciendo que la ganancia de la cámara sea 0 y que el tiempo de exposición sea de un valor tal que el interferograma no se muestre saturado en contraste o brillante. Conviene que los fotogramas por segundo sean pocos, así hay más tiempo para la integración de la imagen.

Attribute	Value
Camera Attributes	
Acquisition Control	
Acquisition Mode	Continuous
Acquisition Frame Count	2
Acquisition Burst Frame Count	1
Exposure Mode	Timed
Exposure Time	100
Exposure Auto	Off
Acquisition Frame Rate	4.9999084016780814
Resulting Frame Rate	4.9999083716786305
Acquisition Frame Rate Enable	true
Acquisition Line Rate	179468.77135678392
Trigger Selector	Frame Start
Trigger Mode	Off
Trigger Software	
Trigger Source	Software
Trigger Activation	
Trigger Overlap	Off
Trigger Delay	14
Sensor Shutter Mode	Global
Analog Control	
Gain Selector	All
Gain	0
Gain Auto	Off
Black Level Selector	All
Black Level Raw	
Black Level	0
Balance Ratio Selector	
Balance Ratio	
Balance White Auto	
Gamma	0.800048828125
Gamma Enable	True

Figura 2.10: Atributos de la cámara con los parámetros que deben ser modificados para adquirir una correcta serie de interferogramas.

Cabe señalar que la luz del LUFABEO debe permanecer apagada en todo momento, pues esta puede dañar la cámara CMOS, además de que el patrón de interferencia no se apreciaría.

2. Establecer las unidades y longitud del paso.
  3. Indicar el número de interferogramas y el tiempo de espera entre cada captura.
  4. Escribir el nombre de los interferogramas e indicar su dirección de guardado.
  5. Apretar el botón *Measurements* para iniciar con el proceso.
- El tiempo para adquirir una serie de 10 interferogramas es de 40 segundos, considerando que entre cada captura hay 1 segundo de espera.
  - En la entrada *Interferogram Name* de la sección *Interferograms* mostrada en la figura 2.11 (a), se indica el nombre pila de los interferogramas. En la figura 2.11 (b) se muestra cómo la aplicación completa el nombre, guardando las capturas de manera ordenada.



(a) Sección de la ventana *Interferograms*

(b) Orden de guardado de los interferogramas

Figura 2.11: Nombre los interferogramas.

- Para capturar los interferogramas, en cada corrida la platina parte desde una misma posición, no importa en donde se encuentre la platina, el sistema siempre la lleva al mismo sitio conocido como *HOME*.
- Los interferogramas son guardados en dos formatos *.bmp* y *.png*.
  1. BMP es una forma de codificar imágenes sin comprimir los datos. Una manera de visualizar este tipo de archivos es utilizar un visor de imágenes universal.
  2. PGM son archivos de texto portables que contienen datos de la imagen en escala de grises. El encabezado de estos archivos contiene diversos datos, por ejemplo, el ancho y alto de la imagen. Una manera sencilla de abrir estos archivos es con MATLAB de la siguiente manera:

```

imagen = imread('archivo.pgm'); % leer archivo PGM
imagen = rot90(imagen); % rotar 90 grados
imagen = flipud(imagen); % espejo

```

En la figura 2.12 se muestra uno interferogramas obtenido con el Sistema de Control del Interferómetro de Fizeau desarrollado.



Figura 2.12: Interferograma obtenido con el Sistema de Control del Interferómetro de Fizeau.

- La interfaz de usuario del sistema tiene visualización jerárquica lo cual facilita su uso y hace que el operador se familiarice más rápido con los controles. El diseño destaca cada una de las partes del sistema, es decir, permite distinguir fácilmente entre los controles de la cámara y el motor.
- La aplicación tiene valores por defecto, como el número de serie del motor, la velocidad y aceleración, la cámara CMOS seleccionada, el tiempo de espera, entre otros, esto con la finalidad de que el usuario no pierda tiempo indicando esta información. Pero estos parámetros son modificables por si en algún momento se requiere trabajar con otro equipo u otros valores.

Durante el periodo de prueba del sistema, se corrigieron errores hallados por el operador.

Esta aplicación queda disponible para una posible segunda versión, donde se pueden implementar más tareas, eliminar funciones obsoletas, añadir más ventanas, etc.

## 2.6. Trabajo a futuro

Se espera que, para una versión futura, el análisis de los interferogramas se haga de manera automática, integrando MATLAB a LabVIEW. Y que se pueda hacer un archivo ejecutable .exe del sistema de control.

# Capítulo 3

## Medición de la fase por Interferometría de Desplazamiento de Fase

Para extraer información como la fase, los coeficientes de los polinomios de Zernike y la forma de la superficie, de los interferogramas obtenidos con el Interferómetro de Fizeau, se usó la técnica Interferometría de Desplazamiento de Fase, la cual se describe en este capítulo, así como los dos algoritmos implementados con esta técnica: mínimos cuadrados y SSPCA.

### 3.1. Interferometría de desplazamiento de fase

El patrón de interferencia de un interferómetro de dos haces, como el de Fizeau, contiene información acerca del frente de onda de la superficie bajo prueba. En un patrón de franjas, la única cantidad medible es la irradiancia, la cual es registrada generalmente con una cámara y almacenada en formato digital. La cámara registra la intensidad con valores discretos en escala grises en una matriz de  $M \times N$  puntos llamados píxeles.

La Interferometría de Desplazamiento de Fase (PSI - *phase shifting interferometry*) consiste en capturar electrónicamente una serie de interferogramas cambiando la fase al introducir una diferencia de camino óptico equidistante en cada uno de ellos. Con esta técnica es posible recuperar la fase del frente de onda, ya que esta se encuentra codificada en las variaciones de intensidad del patrón de interferencia.

La intensidad medida por una cámara puede escribirse como:

$$I(x, y) = I'(x, y) + I''(x, y)\cos[\varphi(x, y) + \delta] \quad (3.1)$$

Donde  $(x, y)$  son las coordenadas de los píxeles,  $\varphi(x, y)$  es la fase a determinar,  $I'(x, y)$  es la iluminación de fondo,  $I''(x, y)$  es la modulación de las intensidades y  $\delta$  es un desplazamiento de fase constante adicional conocido, producido por el cambio en la diferencia de camino óptico.

Se puede decir que el parámetro  $I'$  (fondo) contiene las fluctuaciones de la iluminación, la reflectividad, el ruido electrónico de la cámara, difracción por partículas de polvo; mientras que el parámetro  $I''$  (modulación) indica las intensidades que relacionan los haces de prueba y de referencia, las variaciones de contraste y perturbaciones como vibraciones y turbulencia de aire. [1]

Es posible utilizar cualquier tipo de patrón de interferencia, ya que la técnica PSI no depende de encontrar centros de franjas o seguir franjas, por lo que incluso se puede usar un patrón de franjas cerradas o un patrón sin franjas, es decir una franja muy ancha que cubra todo el sensor de la cámara.

### 3.1.1. ¿Cómo se produce el cambio de fase?

Existen diversos métodos para producir el cambio de fase necesario para poder aplicar el algoritmo PSI. Por ejemplo, 1) introduciendo una diferencia de frecuencia óptica entre los dos haces, 2) usando desfasadores de polarización, 3) trasladando una de las superficies ópticas en el interferómetro con un transductor piezoeléctrico. [1, 5]

Para este trabajo se produjo el cambio de fase trasladando la superficie de referencia a lo largo del eje óptico del haz, por medio de una platina la cual es desplazada por un actuador motorizado que a su vez es controlado por un motor a pasos, como se muestra en la figura 3.1. De esta manera se puede incluir un cambio de fase, al modificar la diferencia entre las trayectorias de los dos haces.

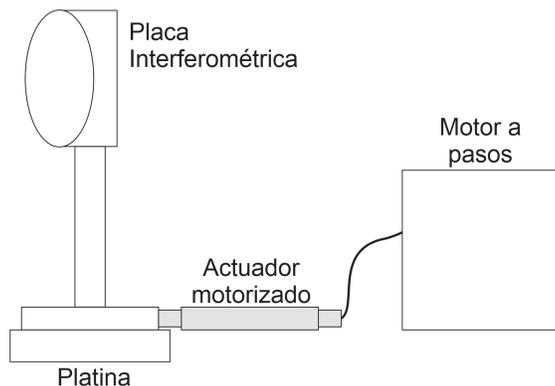


Figura 3.1: Esquema del sistema de desplazamiento utilizado para introducir el cambio de fase.

Para extraer la fase del frente de onda se implementaron dos métodos: 1) Mínimos Cuadrados [6] y 2) Selección Autoadaptativa de Subbloques del Interferograma y Análisis de Componentes Principales (SSPCA - *self-adaptive selection of interferogram subblocks and principal component analysis*) [7], los cuales se describen en las secciones 3.2.1 y 3.4.1 respectivamente.

## 3.2. Algoritmos de Interferometría de Desplazamiento de Fase

Existen diferentes métodos para extraer la fase del frente de onda, el que se use depende de cada aplicación en particular. Todos los algoritmos requieren registrar una serie de interferogramas variando la fase. Se necesita un mínimo de 3 patrones de interferencia diferentes para evaluar la fase deseada.

Algunos de los algoritmos más comunes para PSI son: [1, 5, 8]

- Algoritmo de 3 pasos.

- Algoritmo de Carré (4 pasos).
- Algoritmo de Hariharan (5 pasos).
- Algoritmo de mínimos cuadrados.

Estos métodos difieren en el número de interferogramas capturados, el desplazamiento de fase entre ellos y la susceptibilidad de cada algoritmo a errores en el desplazamiento de fase y el ruido ambiental como vibraciones o turbulencias.

Es deseable usar pocos interferogramas, pues minimiza el tiempo de captura y es más simple de implementar, sin embargo, entre menos número de pasos se tenga, el algoritmo de recuperación de la fase tiende a ser más susceptible al error inducido por el movimiento. Con el fin de obtener mayor precisión de medición y mejor resistencia a los errores, a menudo se utilizan algoritmos de cambio de fase con mayor número de pasos. [9]

El algoritmo de 3 pasos es fácil de implementar, pero es vulnerable a errores de cambio de fase, errores de no linealidad y ruido de intensidad.

El algoritmo de cambio de fase de 4 pasos tiene precisión de medición relativamente alta y buena tolerancia a errores.

El algoritmo de 5 pasos de Hariharan tolera errores bastante grandes en el cambio de fase, pero algoritmos con 5 o más pasos se usan con menos frecuencia que los algoritmos de 3 y 4 pasos debido a que necesitan más patrones de franjas.

Cuando la superficie bajo prueba está sujeta a vibraciones o se encuentra desalineada, el análisis de los interferogramas es mucho más difícil ya que no hay un corrimiento de fase  $\delta$  constante para cada pixel  $(x, y)$ . Estas condiciones no deseadas no corresponden a los modelos utilizados dentro de los algoritmos de PSI convencionales.

Si el desplazamiento de fase  $\delta$  no es el mismo para cada paso, el método de mínimos cuadrados suele ser más conveniente de usar, con restricciones en la intensidad de fondo y la modulación de franjas. El algoritmo de mínimos cuadrados puede disminuir de manera efectiva la incertidumbre en la fase introducida cuando se capturan múltiples interferogramas. El algoritmo trata las fases de referencia como incógnitas adicionales y determina sus valores analizando interferogramas utilizando la técnica de mínimos cuadrados.

### 3.2.1. Algoritmo de mínimos cuadrados

Se uso el método de mínimos cuadrados para extraer la fase del frente de onda de la superficie bajo prueba. El algoritmo a continuación descrito, fue implementado en MATLAB para la medición de la fase. [10]

Este método se basó en un artículo presentado por Greivenkamp [6], donde se menciona que con este algoritmo es posible eliminar restricciones como: la fase entre los dos frentes de onda tiene que variar en pasos iguales; el cambio de fase entre cada interferograma debe ser igual a  $2\pi/N$ , donde  $N$  es un número entero. También se menciona que este procedimiento es insensible

al ruido del interferograma, a las variaciones de la capacidad de respuesta del detector y al cambio de contraste en las franjas.

Como se mencionó en la sección 3.1, una expresión general para describir el patrón de intensidad de un interferograma es:

$$I(x, y, \delta) = I'(x, y) + I''(x, y)\cos[\varphi(x, y) - \delta]$$

Donde  $\varphi(x, y)$  es la diferencia de fase desconocida entre los dos frentes de onda,  $\delta$  es un desplazamiento de fase variable entre los dos haces y  $I'$  e  $I''$  son fondo y contraste respectivamente. El parámetro  $\delta$  no tiene dependencia en  $(x, y)$ , esta condición se satisface manteniendo la intensidad de salida del láser constante durante las mediciones.

Al cambiar la fase en los interferogramas, esta puede variar linealmente en un rango de  $\Delta$  durante las mediciones, de modo que el patrón de intensidad puede representarse de la siguiente manera:

$$I(x, y) = \frac{1}{\Delta} \int_{\delta-\Delta/2}^{\delta+\Delta/2} I(x, y, \delta) d\delta \quad (3.2)$$

El término  $1/\Delta$  es un factor de normalización que permite que la señal integrada sea independiente de  $\Delta$ . En el límite cuando  $\Delta$  tiende a cero, la fase se mantiene constante durante la captura del interferograma. Entonces la ecuación 3.2 queda como:

$$I(x, y) = I'(x, y) + I''(x, y) \operatorname{sinc}(\Delta/2) \cos[\varphi(x, y) - \delta] \quad (3.3)$$

Usando una identidad trigonométrica, la ecuación 3.4, se puede reescribir para el ajuste de mínimos cuadrados:

$$I(x, y) = I'(x, y) + I''(x, y) \operatorname{sinc}(\Delta/2) \cos[\varphi(x, y)] \cos(\delta) + I''(x, y) \operatorname{sinc}(\Delta/2) \sin[\varphi(x, y)] \sin(\delta) \quad (3.4)$$

Esta ecuación es de la forma:

$$I(x, y) = a_0(x, y) + a_1(x, y)f_1(\delta) + a_2(x, y)f_2(\delta) \quad (3.5)$$

Donde:

$$\begin{aligned} a_0(x, y) &= I'(x, y) \\ a_1(x, y) &= I''(x, y) \operatorname{sinc}(\Delta/2) \cos[\varphi(x, y)] \\ f_1(\delta) &= \cos(\delta) \\ a_2(x, y) &= I''(x, y) \operatorname{sinc}(\Delta/2) \sin[\varphi(x, y)] \\ f_2(\delta) &= \sin(\delta) \end{aligned}$$

Las  $a(x, y)$ 's son las incógnitas. Para el ajuste por mínimos cuadrados, las ecuaciones anteriores se pueden escribir de una forma matricial. La solución está dada por la ecuación 3.6.

$$\begin{bmatrix} a_0(x, y) \\ a_1(x, y) \\ a_2(x, y) \end{bmatrix} = A^{-1}(\delta)B(x, y, \delta) \quad (3.6)$$

Donde:

$$A(\delta) = \begin{bmatrix} N & \sum \cos(\delta) & \sum \sin(\delta) \\ \sum \cos(\delta) & \sum \cos^2(\delta) & \sum \cos(\delta) \sin(\delta) \\ \sum \sin(\delta) & \sum \cos(\delta) \sin(\delta) & \sum \sin^2(\delta) \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

$$B(x, y, \delta) = \begin{bmatrix} \sum I \\ \sum I \cos(\delta) \\ \sum I \sin(\delta) \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

Todas las sumas son de 1 a  $N$ , donde  $N$  es el número de interferogramas adquiridos.

Finalmente, la fase del frente de onda se puede determinar por la ecuación 3.10:

$$\frac{a_2(x, y)}{a_1(x, y)} = \frac{I''(x, y) \operatorname{sinc}(\Delta/2) \sin[\varphi(x, y)]}{I''(x, y) \operatorname{sinc}(\Delta/2) \cos[\varphi(x, y)]} = \tan[\varphi(x, y)] \quad (3.9)$$

$$\varphi(x, y) = \tan^{-1} \left[ \frac{a_2(x, y)}{a_1(x, y)} \right] \quad (3.10)$$

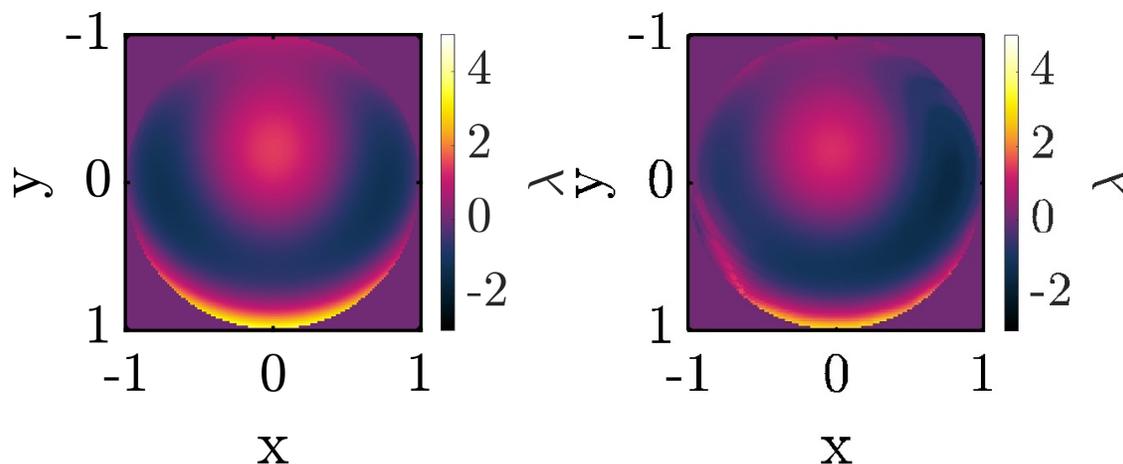
Si  $a_0$  es calculada, se puede determinar el contraste de las franjas de los interferogramas por la ecuación 3.11:

$$\frac{I''(x, y)}{I'(x, y)} = \frac{[a_1(x, y)^2 + a_2(x, y)^2]^{\frac{1}{2}}}{a_0(x, y) \operatorname{sinc}(\Delta/2)} \quad (3.11)$$

Se puede ver que la fase se puede calcular aun si se desconoce el período de integración  $\Delta$ , la única condición es que  $\Delta$  sea el mismo para el conjunto de interferogramas.

Se implemento en MATLAB este algoritmo [10], tanto para datos teóricos como para los interferogramas experimentales obtenidos con el Sistema de Control del Interferómetro de Fizeau mencionado en el capítulo 2. Los resultados experimentales de la implementación de este algoritmo se muestran en la sección 4.1.

Para obtener datos teóricos, se modelo un frente de onda con polinomios de Zernike [10] con diferentes valores en los coeficientes de las aberraciones. Mostrando que el algoritmo de mínimos cuadrados funciona correctamente, al modelar un frente de onda con aberración esférica de tercer orden  $Z_8 = 0,5$ , astigmatismo par de tercer orden  $Z_4 = 0,5$  y coma par de tercer orden  $Z_6 = 0,5$  ( $Z_j$  orden del polinomio de Zernike, ver sección 3.6). En la figura 3.2 (a) se muestra el mapa OPD modelado y en la figura 3.2 (b) se muestra el mapa OPD recuperado con el algoritmo de mínimos cuadrados. En ambos mapas se presentan datos normalizados.



(a) Mapa OPD modelado con polinomios de Zernike. (b) Mapa OPD recuperado con el algoritmo de mínimos cuadrados.

Figura 3.2: Comparación mapas de OPD datos teóricos.

### 3.3. Desenvolvimiento de fase

Sin importar el algoritmo que haya sido usado para extraer la fase, esta debe pasar por un proceso antes de construir el mapa del frente de onda. Es necesario eliminar cualquier discontinuidad de fase  $2\pi$ , resultante de la tangente inversa en la ecuación 3.10, a este proceso se le conoce como desenvolvimiento de fase.

Dado que la función arcotangente se encuentra definida únicamente en el rango  $(-\pi/2, \pi/2)$ , se deben convertir los datos de la fase a módulo  $2\pi$ .

El desenvolvimiento de fase consiste en sumar o restar  $2\pi$  o múltiplos de  $2\pi$ , hasta que los datos puedan unirse sin que haya saltos de la fase, es decir, hasta que haya un perfil continuo. Este proceso se puede ver gráficamente para datos en una dimensión en la figura 3.3, al considerar la señal compleja  $s = e^{(i4\pi x)}$  con  $-0,5 \leq x \leq 0,5$ .

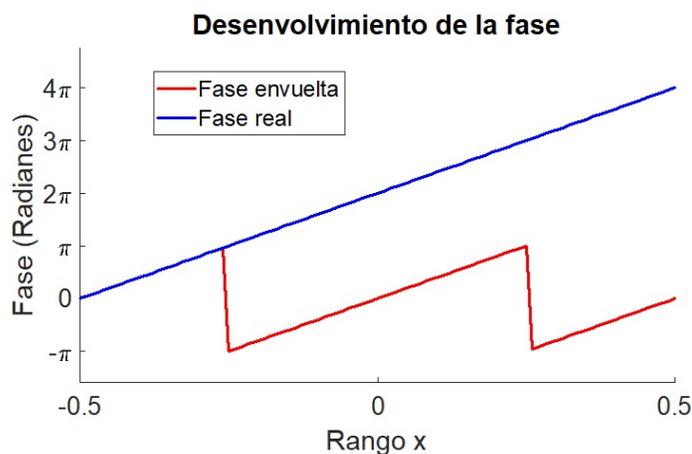


Figura 3.3: Ejemplo de desenvolvimiento de la fase.

En la tabla 3.1 se ejemplifica como se debe hacer la corrección de la fase.

Tabla 3.1: Fase y rango de valores según los signos del numerador ( $\sin\varphi$ ) y del denominador ( $\cos\varphi$ ) en la expresión  $\tan(\varphi)$  en módulo  $2\pi$ .

Signo del $\sin$	Signo del $\cos$	Fase corregida	Rango de fase
0	+	0	0
+	+	$\varphi(x, y)$	0 a $\pi/2$
+	0	$\pi/2$	$\pi/2$
+	-	$\varphi(x, y) + \pi$	$\pi/2$ a $\pi$
0	-	$\pi$	$\pi$
-	-	$\varphi(x, y) + \pi$	$\pi$ a $3\pi/2$
-	0	$3\pi/2$	$3\pi/2$
-	+	$\varphi(x, y) + 2\pi$	$3\pi/2$ a $2\pi$

El desenvolvimiento de fase en dos dimensiones es un problema mucho más complejo que el descrito anteriormente. Existen distintos algoritmos para desenvolver la fase. Múltiples publicaciones tratan de dar solución a este problema para diversas aplicaciones. Para este trabajo se usó un código de MATLAB desarrollado por Muhammad F. Kasim (University of Oxford, 2016) basado en el artículo de Ghiglia y Romero [11].

### 3.4. Errores en Interferometría de Desplazamiento de Fase

Independientemente de los algoritmos que se hayan usado para la extracción de fase, y el método usado para introducir el cambio de fase, siempre habrá errores en los datos. Los errores pueden deberse a diversos factores y los podemos dividir en tres categorías: 1) proceso de captura de los datos, 2) factores ambientales como vibración y turbulencia y 3) defectos en el diseño y fabricación de los instrumentos utilizados.

Algunos factores que se presentaron en la capturar los interferogramas y que produjeron errores son los siguientes:

- Inestabilidad en la intensidad de la fuente de luz.
- La alineación del interferómetro no es perfecta y genera un tilt (inclinación) en la superficie de prueba.
- Vibraciones debido a que el LUFABEO se encuentra a lado de un taller mecánico.

Los errores debido a la vibración fueron los que más afectaron en este caso, pues causó cambios de fase incorrectos, además de ser una de las limitantes principales para poder utilizar PSI, pues la estabilidad mecánica es primordial en la interferometría.

Se trató de minimizar las vibraciones con el uso de gomas puestas debajo de la mesa óptica, a manera de dar soporte aislante y amortiguar las vibraciones ya que la mesa no cuenta con un

sistema de amortiguamiento propio. Como ya se mencionó en el capítulo 2, uno de los motivos por los cuales se desarrolló un sistema que maneja el interferómetro de Fizeau, fue introducir menos errores en la captura de los interferogramas, lo cual también ayudó a maximizar la estabilidad.

### 3.4.1. Selección Autoadaptativa de Subbloques del Interferograma y Análisis de Componentes Principales (SSPCA)

Como ya se mencionó, errores en la alineación del interferómetro introduce un cambio de inclinación, para dar solución a este problema se implementó un algoritmo de cambio de fase inmune al cambio de inclinación rápido y preciso basado en la selección autoadaptativa de subbloques de interferograma y análisis de componentes principales. [7]

Una vez que se capturo el conjunto de interferogramas, estos llevan un proceso posterior para extraer la fase, cabe señalar que este algoritmo es independiente al de mínimos cuadrados presentado en la sección 3.2.1.

El principio de funcionamiento del SSPCA (*self-adaptive selection of interferogram subblocks and principal component analysis*) se muestra en la figura 3.4.

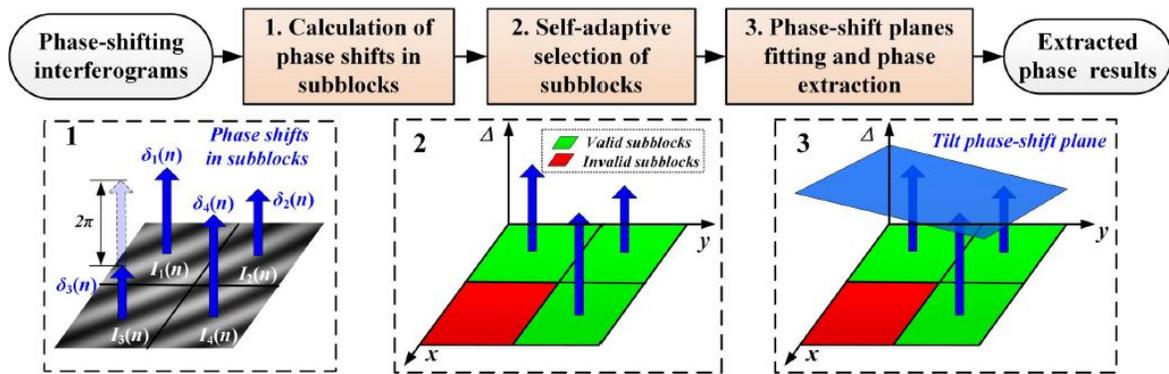


Figura 3.4: Principio de funcionamiento del SSPCA. Figura tomada de la referencia [7].

De manera muy general SSPCA realiza tres principales pasos:

1. En un inicio cada interferograma es dividido en varios subbloques (en la figura 3.4 se muestra el caso de 4 subbloques) y se aplica el análisis de componentes principales y el método de mínimos cuadrados para obtener el valor del desplazamiento de fase de cada subbloque.
2. Después, según los coeficientes de correlación entre cada curva de desfase, se pueden distinguir automáticamente subbloques válidos e inválidos.
3. Finalmente, todos los valores de cambio de fase de los subbloques válidos se usan para ajustar el plano de cambio de inclinación y los resultados de la fase se pueden obtener utilizando el algoritmo de mínimos cuadrados.

El número de subbloques es importante en el algoritmo de SSPCA.

Entre más grande sea el error de cambio de fase por inclinación, es más probable un desenvolvimiento anormal de la fase, por lo que se necesitan más subbloques para garantizar el cálculo. Si el número de subbloques válidos es muy pequeño, entonces el número total de subbloques debe aumentarse.

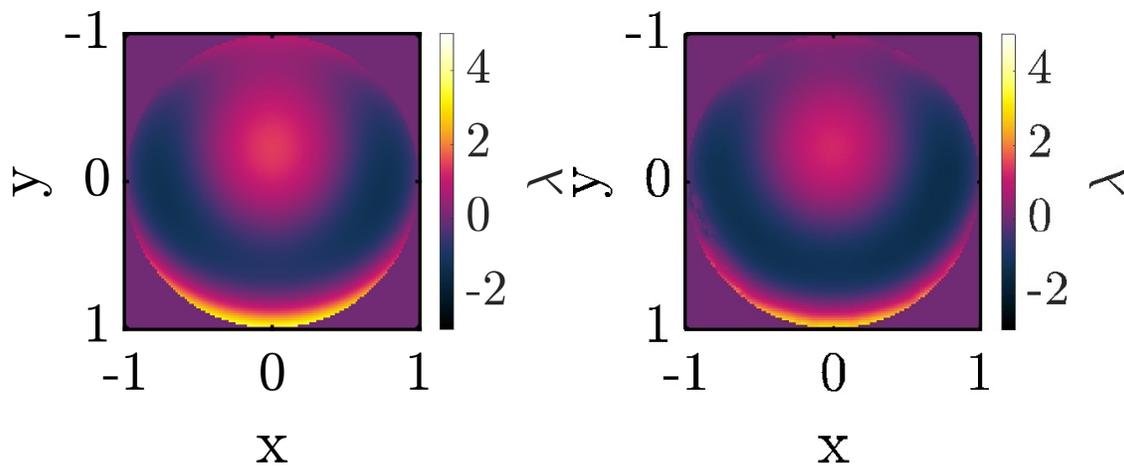
Por otra parte, al aumentar el número de subbloques, el número de franjas en cada subinterferograma es menor, entonces la precisión de SSPCA podría disminuir.

En conclusión, pocos o muchos subbloques pueden disminuir la precisión del algoritmo, por lo que, se debe elegir un número de subbloques que aseguren la precisión.

Se eligió trabajar con subbloques de 4x4, 8x8 y 16x16, con el fin de hacer una comparación entre los resultados de cada uno.

Al igual que en el algoritmo de mínimos cuadrados, los resultados de la implementación de SSPCA [10] con interferogramas experimentales se muestran en la sección 4.1.

Utilizando el mismo frente de onda modelado con polinomios de Zernike [10] presentado en la figura 3.2 (aberración esférica de tercer orden  $Z_8 = 0,5$ , astigmatismo par de tercer orden  $Z_4 = 0,5$  y coma par de tercer orden  $Z_6 = 0,5$ ), se comprobó el funcionamiento de SSPCA. En la figura 3.5 (a) se muestra el mapa OPD modelado y en la figura 3.5 (b) se muestra el mapa OPD recuperado con SSPCA con subbloques 16x16. En ambos mapas se presentan datos normalizados.



(a) Mapa OPD modelado con polinomios de Zernike. (b) Mapa OPD recuperado con SSPCA con subbloques 16x16.

Figura 3.5: Comparación mapas de OPD datos teóricos.

### 3.5. Diferencia de camino óptico

La diferencia de camino óptico (OPD - *optical path difference*) se refiere a la diferencia de trayectoria recorrida (o cambio de fase) que existe entre dos rayos que pasan a través de diferentes medios, desde el mismo punto de origen. Cuando los rayos pasan a través de un sistema óptico, la

OPD entre los frentes de onda de referencia y de prueba, se atribuye a aberraciones ópticas.

Si los dos haces provienen de la misma fuente, de modo que tienen la misma fase en el origen, la diferencia de fase  $\varphi(x, y)$  está relacionada con la diferencia de camino óptico.

Para obtener un mapa OPD, es necesario dividir la fase entre el número de onda. La ecuación 3.12 muestra una manera de escribir la diferencia de camino óptico.

$$OPD(x, y) = \frac{\lambda}{2\pi} \varphi(x, y) \quad (3.12)$$

Donde  $\lambda$  es la longitud de onda del láser con el que se está trabajando.

### 3.6. Ajuste de los polinomios de Zernike a partir de la diferencia de camino óptico

Las aberraciones son variaciones del frente de onda real comparado con un frente de onda esférico ideal, se pueden representar de dos formas: coeficientes de aberración de frente de onda y polinomios de Zernike. Ambas maneras se encuentran limitadas, pues solo pueden representar las aberraciones de manera precisa, en sistemas ópticos rotacionalmente simétricos (pupilas circulares). [12]

Dado que los polinomios de Zernike tienen la misma forma que las aberraciones encontradas en pruebas ópticas, resultan útiles para representar el frente de onda de un sistema óptico.

El LUFABEO cuenta con una máquina para el pulido de superficies ópticas, dicha máquina trabaja con los coeficientes de los polinomios de Zernike. Por ello es necesario obtener los polinomios de Zernike a partir de la diferencia de camino óptico, resultado de dividir la fase entre el número de onda.

Existen diversas notaciones para definir los polinomios de Zernike, por ello es importante verificar cual se está utilizando al momento de hacer la comparación de los coeficientes.

Una manera de definir los polinomios de Zernike es en coordenadas polares  $Z(\rho, \theta)$ , donde  $\rho$  es la coordenada radial normalizada (ecuación 3.13):

$$\rho = \frac{r}{r_0} \quad (3.13)$$

Donde  $r_0$  es el radio de la pupila y  $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ ,  $\theta = \tan^{-1}(\frac{y}{x})$ .  
Entonces los polinomios de Zernike quedan de la forma:

$$Z_n^m(\rho, \theta) = [2(n + 1/(1 + \delta_m 0))]^{\frac{1}{2}} R_n^m(\rho) \cos(m\theta) \quad (3.14)$$

Donde  $\delta_{ij}$  es la delta de Kronecker y

$$R_n^m(\rho) = \sum_{s=0}^{\frac{n-m}{2}} \frac{(-1)^s (n-s)!}{s! \left(\frac{n+m}{2} - s\right)! \left(\frac{n-m}{2} - s\right)!} \rho^{n-2s} \quad (3.15)$$

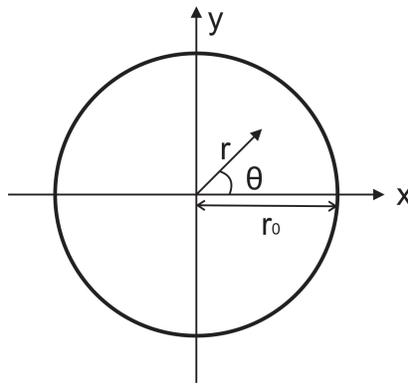


Figura 3.6: Representación en el plano cartesiano de los parámetros que describen a los polinomios de Zernike en coordenadas polares.

Las aberraciones del frente de onda  $W(\rho, \theta)$ , se pueden expandir en términos de los polinomios de Zernike  $Z_n^m(\rho, \theta)$ , que son ortonormales sobre una pupila unitaria (ecuación 3.16):

$$W(\rho, \theta) = \sum_{n=0}^{k \rightarrow \infty} \sum_{m=0}^n C_{nm} Z_n^m(\rho, \theta) \quad , \quad 0 \leq \rho \leq 1 \quad , \quad 0 \leq \theta \leq 2\pi \quad (3.16)$$

Donde  $C_{nm}$  son los coeficientes de expansión ortonormal que dependen de la ubicación del objeto.

$$C_{nm} = \frac{1}{\pi} \int_0^1 \int_0^{2\pi} W(\rho, \theta) Z_n^m(\rho, \theta) \rho d\rho d\theta \quad (3.17)$$

En la práctica es imposible hacer la suma hasta infinito, se delimita  $k$  de tal manera que se tenga una representación adecuada del frente de onda. Las aberraciones del frente de onda se suelen representar hasta el séptimo orden.

En la tabla 3.2 se muestran los primeros 25 polinomios radiales de Zernike  $Z_j(\rho, \theta)$  con estándar ANSI.

Para ajustar la diferencia de camino óptico a los coeficientes de los polinomios de Zernike, se hizo un ajuste de mínimos cuadrados descrito por Rayces. [13]

En la sección 4.1 se muestran los resultados experimentales obtenidos a partir de interferogramas capturados, tanto por el algoritmo de SSPCA, como el de mínimos cuadrados, ambos algoritmos fueron implementados en MATLAB [10]; al igual que el programa que obtiene los coeficientes antes mencionados.

Cabe mencionar que es de suma importancia indicar en el algoritmo, si las superficies de prueba y de referencia (placa interferométrica), se acerca o se alejan, para tener resultados correspondientes al modelo experimental. En este caso, la placa interferométrica se acerca a la superficie bajo prueba a medida que se desplaza.

Tabla 3.2: Polinomios de Zernike.

Índice OSA/ANSI ( $j$ )	Grado radial ( $n$ )	Grado azimutal ( $m$ )	$Z_j(\rho, \theta)$	Nombre de la aberración
0	0	0	1	Pistón
1	1	1	$2\rho\cos\theta$	Inclinación eje vertical
2	1	1	$2\rho\sin\theta$	Inclinación eje horizontal
3	2	0	$\sqrt{3}(2\rho^2 - 1)$	Defoco
4	2	2	$\sqrt{6}\rho^2\cos(2\theta)$	Astigmatismo par 3er orden
5	2	2	$\sqrt{6}\rho^2\sin(2\theta)$	Astigmatismo impar 3er orden
6	3	1	$\sqrt{8}(3\rho^3 - 2\rho)\cos(2\theta)$	Coma par 3er orden
7	3	1	$\sqrt{8}(3\rho^3 - 2\rho)\sin(2\theta)$	Coma impar 3er orden
8	4	0	$\sqrt{5}(6\rho^4 - 6\rho^2 + 1)$	Aberración esférica 3er orden
9	3	3	$\sqrt{8}\rho^3\cos(3\theta)$	
10	3	3	$\sqrt{8}\rho^3\sin(3\theta)$	
11	4	2	$\sqrt{10}(4\rho^4 - 3\rho^2)\cos(2\theta)$	Astigmatismo par 5to orden
12	4	2	$\sqrt{10}(4\rho^4 - 3\rho^2)\sin(2\theta)$	Astigmatismo impar 5to orden
13	5	1	$\sqrt{12}(10\rho^5 - 12\rho^3 + 3\rho)\cos(\theta)$	Coma par 5to orden
14	5	1	$\sqrt{12}(10\rho^5 - 12\rho^3 + 3\rho)\sin(\theta)$	Coma impar 5to orden
15	6	0	$\sqrt{7}(20\rho^6 - 30\rho^4 + 12\rho^2 - 1)\cos(\theta)$	Aberración esférica 5to orden
16	4	4	$\sqrt{10}\rho^4\cos(4\theta)$	
17	4	4	$\sqrt{10}\rho^4\sin(4\theta)$	
18	5	3	$\sqrt{12}(5\rho^5 - 4\rho^3)\cos(3\theta)$	
19	5	3	$\sqrt{12}(5\rho^5 - 4\rho^3)\sin(3\theta)$	
20	6	2	$\sqrt{14}(15\rho^6 - 30\rho^4 + 6\rho^2)\cos(2\theta)$	Astigmatismo par 7mo orden
21	6	2	$\sqrt{14}(15\rho^6 - 30\rho^4 + 6\rho^2)\sin(2\theta)$	Astigmatismo impar 7mo orden
22	7	1	$4(35\rho^7 - 60\rho^5 + 30\rho^3 - 4\rho)\cos(\theta)$	Coma par 7mo orden
23	7	1	$4(35\rho^7 - 60\rho^5 + 30\rho^3 - 4\rho)\sin(\theta)$	Coma impar 7mo orden
24	8	0	$3(70\rho^8 - 140\rho^6 + 90\rho^4 - 20\rho^2 + 1)$	Aberración esférica 7mo orden

# Capítulo 4

## Resultados y conclusiones

Se presentan los resultados del análisis de Interferometría de Desplazamiento de Fase con el método de mínimos cuadrados y el algoritmo SSPCA, de los interferogramas capturados con el Sistema de Control del Interferómetro de Fizeau; y las conclusiones del trabajo.

### 4.1. Resultados

La figura 4.1 muestra el Interferómetro de Fizeau construido y el sistema de control implementado.

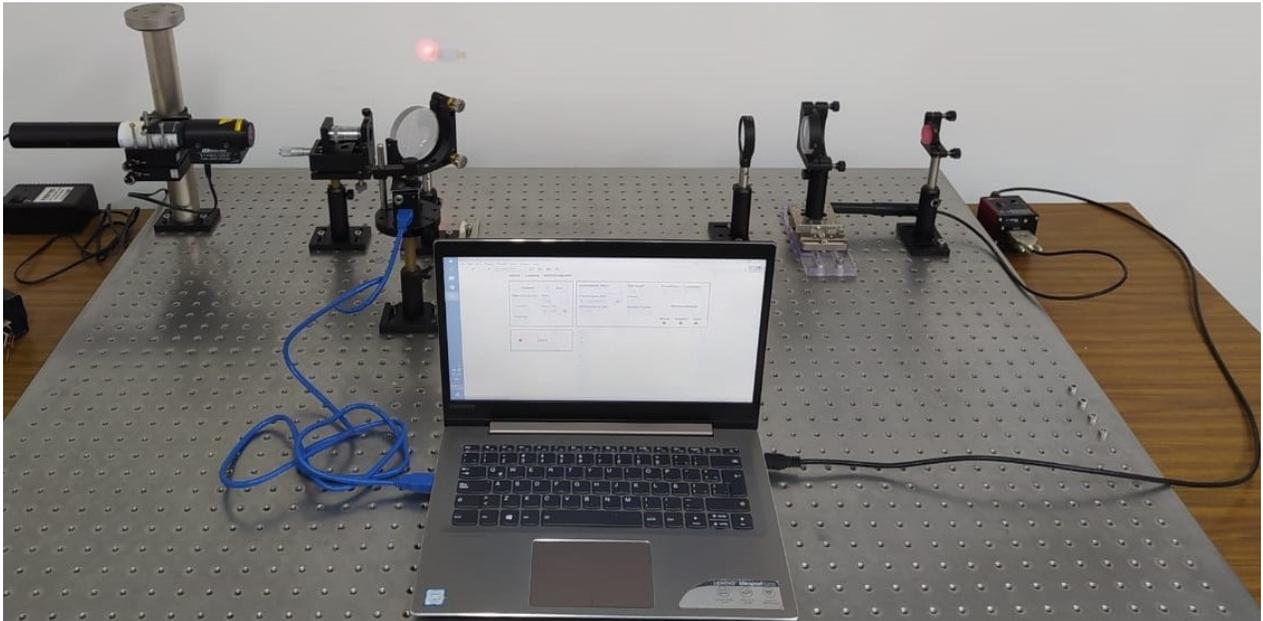


Figura 4.1: Interferómetro de Fizeau construido y el sistema de control para manejarlo.

Tanto el Sistema de Control como los algoritmos de Interferometría de Desplazamiento de Fase, se encuentran en una misma carpeta, la cual puede copiarse en cualquier computadora que cuente con MATLAB y LabVIEW, para poder manejar el Interferómetro de Fizeau y analizar los interferogramas. Además, en dicha carpeta se encuentra un Manual que guiará al usuario con el correcto manejo del interferómetro, su control y el análisis de los interferogramas.

La superficie bajo prueba fue un vidrio común de ventana, cortado de manera circular con un diámetro de 2 pulgadas y para evitar reflexión de la cara posterior, esta fue pintada con esmalte.

Se tomaron 8 series de interferogramas con un paso de  $10\ \mu m$  en 3 diferentes días, con el fin de demostrar la repetibilidad de los algoritmos, al momento de calcular la forma de la superficie.

17 marzo 2020	2 series
14 octubre 2020	3 series
3 marzo 2021	3 series

En la figura 4.2 se muestran únicamente 3 de los 10 interferogramas consecutivos de una sola serie, para cada uno de los 3 días, con un paso de  $10\ \mu m$ .

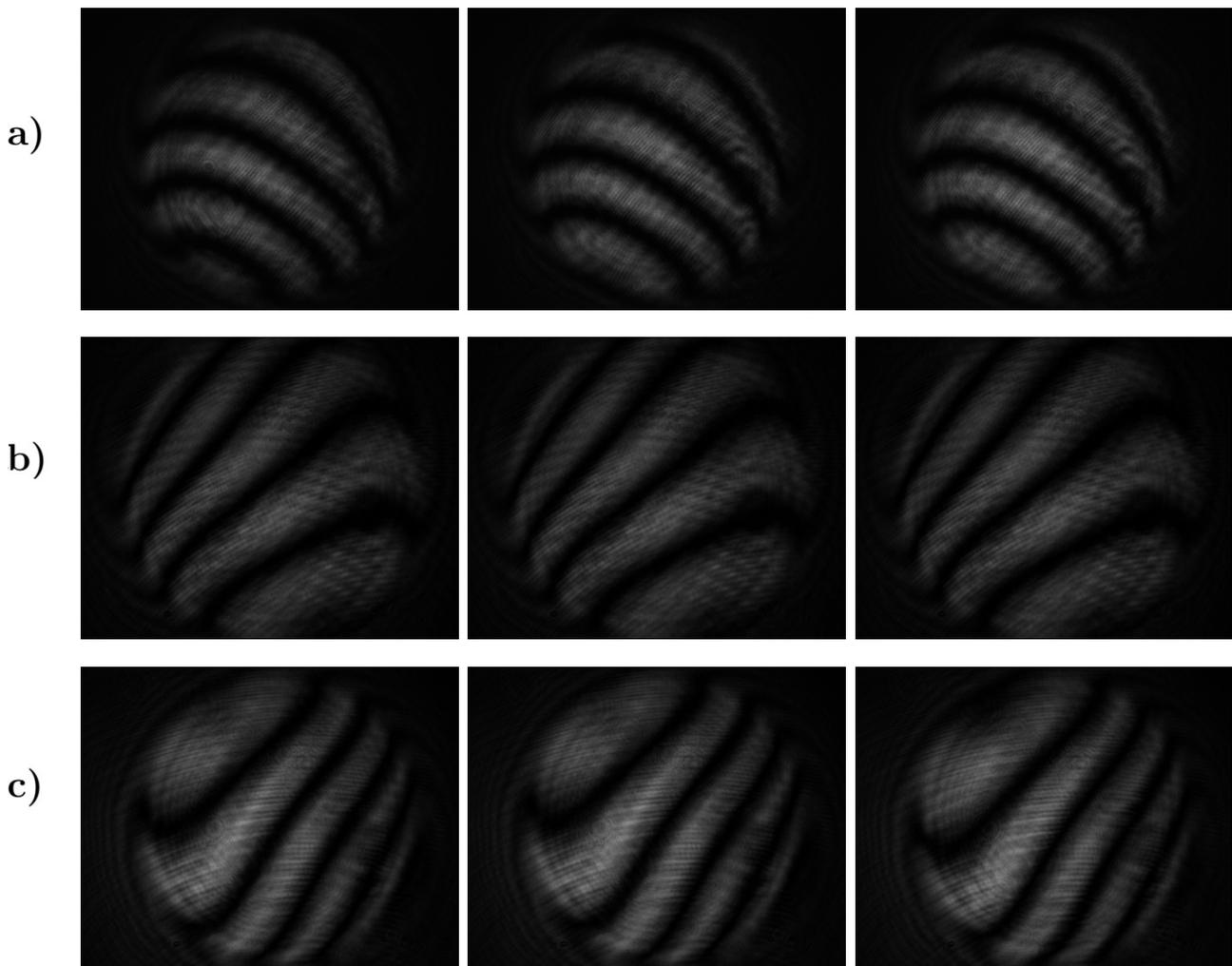


Figura 4.2: Interferogramas consecutivos de una serie con paso de  $10\ \mu m$ . Fila a) 17 marzo 2020, fila b) 14 octubre 2020 y fila c) 3 marzo 2021.

Las 8 series se analizaron con el método de mínimos cuadrados y el algoritmo SSPCA. El algoritmo SSPCA hace un análisis con  $4 \times 4$ ,  $8 \times 8$  y  $16 \times 16$  subbloques, los cuales muestran resultados muy similares entre sí. Únicamente se muestran los resultados del análisis de  $8 \times 8$  subbloques y se hace la comparación con mínimos cuadrados.

La figura 4.3 muestra los mapas de Diferencia de Camino Óptico recuperados para una pupila normalizada, usando Mínimos Cuadrados y SSPCA  $8 \times 8$ , para las 2 series de interferogramas capturados el 17 marzo 2020.

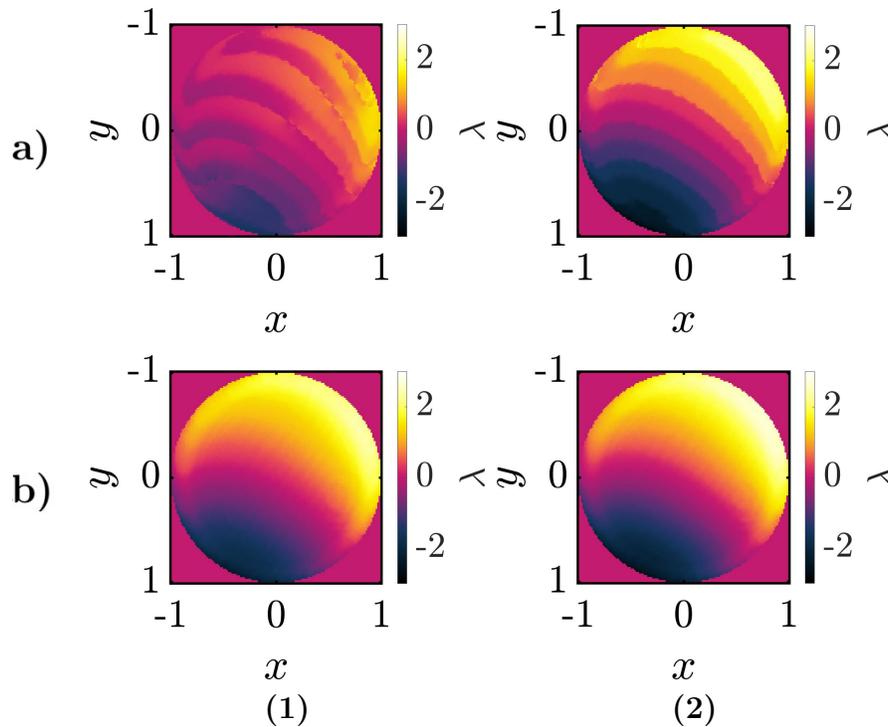


Figura 4.3: Mapas OPD recuperados, pruebas (1) y (2) del 17 marzo 2020. Fila a) Mínimos cuadrados y fila b) SSPCA  $8 \times 8$ . En la barra de colores, los valores negativos representan niveles en la superficie por debajo de la referencia y los positivos niveles por arriba de la referencia.

Se puede ver que, con el algoritmo de mínimos cuadrados, los mapas OPD recuperados muestran diferencias entre ambas pruebas.

La raíz del error cuadrático medio (RMSE) es un valor que mide el error que hay entre dos conjuntos de datos. Se calculo el RMSE con los valores de los mapas de OPD recuperados presentados en la figura 4.3.

En la tabla 4.1 se muestran los valores de RMSE, que comparan al algoritmo de mínimos cuadrados con SSPCA de las dos pruebas hechas el 17 marzo 2020, y la comparación entre ambas pruebas analizadas con mismo algoritmo.

Tabla 4.1: Comparación del error cuadrático medio de los valores de los mapas OPD recuperados, para mínimos cuadrados y SSPCA de las dos pruebas hechas el 17 marzo 2020.

	Mínimos Cuadrados Prueba 1	SSPCA Prueba 2
Mínimos Cuadrados Prueba 2	0.6532720 [ $\lambda$ ]	0.1316714 [ $\lambda$ ]
SSPCA Prueba 1	0.6405835 [ $\lambda$ ]	0.2774778 [ $\lambda$ ]

Al observar los valores de la tabla 4.1, se puede ver que el algoritmo de SSPCA entrega valores más similares entre sí, de la fase recuperada de las dos pruebas correspondientes al 17 marzo 2020, a diferencia del método de mínimos cuadrados, que presenta mayor variación entre ambas pruebas, al tener un RMSE más grande.

Los algoritmos ajustan los primeros 25 polinomios de Zernike, dando así los valores de los coeficientes correspondientes.

Tabla 4.2: Índice y nombre de los primeros 25 polinomios de Zernike.

Índice	Polinomio de Zernike	Nombre de la aberración
0	1	Pisón
1	$2\rho\cos\theta$	Inclinación eje vertical
2	$2\rho\sin\theta$	Inclinación eje horizontal
3	$\sqrt{3}(2\rho^2 - 1)$	Defoco
4	$\sqrt{6}\rho^2\cos(2\theta)$	Astigmatismo par 3er orden
5	$\sqrt{6}\rho^2\sin(2\theta)$	Astigmatismo impar 3er orden
6	$\sqrt{8}(3\rho^3 - 2\rho)\cos(2\theta)$	Coma par 3er orden
7	$\sqrt{8}(3\rho^3 - 2\rho)\sin(2\theta)$	Coma impar 3er orden
8	$\sqrt{5}(6\rho^4 - 6\rho^2 + 1)$	Aberración esférica 3er orden
9	$\sqrt{8}\rho^3\cos(3\theta)$	
10	$\sqrt{8}\rho^3\sin(3\theta)$	
11	$\sqrt{10}(4\rho^4 - 3\rho^2)\cos(2\theta)$	Astigmatismo par 5to orden
12	$\sqrt{10}(4\rho^4 - 3\rho^2)\sin(2\theta)$	Astigmatismo impar 5to orden
13	$\sqrt{12}(10\rho^5 - 12\rho^3 + 3\rho)\cos(\theta)$	Coma par 5to orden
14	$\sqrt{12}(10\rho^5 - 12\rho^3 + 3\rho)\sin(\theta)$	Coma impar 5to orden
15	$\sqrt{7}(20\rho^6 - 30\rho^4 + 12\rho^2 - 1)\cos(\theta)$	Aberración esférica 5to orden
16	$\sqrt{10}\rho^4\cos(4\theta)$	
17	$\sqrt{10}\rho^4\sin(4\theta)$	
18	$\sqrt{12}(5\rho^5 - 4\rho^3)\cos(3\theta)$	
19	$\sqrt{12}(5\rho^5 - 4\rho^3)\sin(3\theta)$	
20	$\sqrt{14}(15\rho^6 - 30\rho^4 + 6\rho^2)\cos(2\theta)$	Astigmatismo par 7mo orden
21	$\sqrt{14}(15\rho^6 - 30\rho^4 + 6\rho^2)\sin(2\theta)$	Astigmatismo impar 7mo orden
22	$4(35\rho^7 - 60\rho^5 + 30\rho^3 - 4\rho)\cos(\theta)$	Coma par 7mo orden
23	$4(35\rho^7 - 60\rho^5 + 30\rho^3 - 4\rho)\sin(\theta)$	Coma impar 7mo orden
24	$3(70\rho^8 - 140\rho^6 + 90\rho^4 - 20\rho^2 + 1)$	Aberración esférica 7mo orden

En la tabla 4.3 se muestran los coeficientes para cada una de las 8 pruebas, se omitieron los primeros 4 términos los cuales corresponden a pistón, inclinación en el eje vertical y horizontal y defoco, pues estos no se consideran aberraciones. Los coeficientes mostrados tienen unidades de  $\lambda$ , referente a la longitud de onda del láser de  $632.8 \text{ nm}$ , si la  $\lambda$  cambia, los coeficientes de los polinomios también cambian, pero no las aberraciones.

Tabla 4.3: Coeficientes de los polinomios de Zernike experimentales  $[\lambda]$ , omitiendo los términos de pistón, inclinación en el eje vertical y horizontal y defoco.

Índice	17 marzo 2020				14 octubre 2020						3 marzo 2021					
	Mínimos cuadrados		SSPCA 8x8		Mínimos cuadrados			SSPCA 8x8			Mínimos cuadrados			SSPCA 8x8		
	Test 1	Test 2	Test 1	Test 2	Test 1	Test 2	Test 3	Test 1	Test 2	Test 3	Test 1	Test 2	Test 3	Test 1	Test 2	Test 3
4	-0.23	-0.17	-0.22	-0.22	-0.18	-0.13	-0.18	-0.19	-0.18	-0.18	-0.19	-0.19	-0.20	-0.19	-0.19	-0.20
5	0.02	0.12	0.11	0.11	0.09	0.10	0.09	0.09	0.09	0.09	0.10	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09
6	0.03	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
7	0.02	-0.01	0.00	0.00	-0.02	-0.02	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00
8	0.03	-0.01	-0.01	-0.01	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.03	0.01	0.03	0.03	0.02	0.03
9	-0.04	0.02	0.01	0.02	0.01	0.03	0.00	0.01	0.00	0.01	-0.01	-0.01	0.01	0.01	0.00	0.00
10	-0.01	0.03	0.01	0.02	0.00	-0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
11	0.02	0.01	0.02	0.02	-0.01	-0.01	0.00	0.00	-0.01	-0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02	0.01
12	0.00	0.00	-0.01	-0.02	-0.01	-0.01	-0.01	0.00	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.02	-0.01
13	0.00	0.01	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00
14	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.03	0.04	0.03	0.03	0.04	0.03
15	-0.01	-0.05	-0.06	-0.06	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	-0.02	-0.02	-0.01	-0.01	-0.02	-0.01
16	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
17	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	-0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
18	0.01	-0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
19	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.01	0.00	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01
20	0.00	0.01	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
21	-0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.01	-0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
22	-0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00
23	-0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.03	0.02	0.03	0.03	0.03
24	-0.02	-0.03	-0.04	-0.04	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02

La desviación estándar es una medida de dispersión que muestra qué tan lejos están los datos respecto al promedio o el valor esperado.

Se determinó la desviación estándar de los coeficientes de los polinomios de Zernike mostrados en la tabla 4.3.

Tabla 4.4: Desviación estándar de los coeficientes de los polinomios de Zernike mostrados en la tabla 4.3.

Índice	Nombre de la aberración	Promedio del coeficiente [ $\lambda$ ]	Desviación estándar [ $\lambda$ ]	Valor máximo esperado [ $\lambda$ ]	Valor mínimo esperado [ $\lambda$ ]
4	Astigmatismo par 3er orden	-0.19	0.02	-0.17	-0.21
5	Astigmatismo impar 3er orden	0.09	0.01	0.1	0.08
6	Coma par 3er orden	0.01	0.01	0.02	0
7	Coma impar 3er orden	0	0.01	0.01	-0.01
8	Aberración esférica 3er orden	0.02	0.02	0.04	0
9		0.01	0.01	0.02	0
10		0	0.01	0.01	-0.01
11	Astigmatismo par 5to orden	0.01	0.01	0.02	0
12	Astigmatismo impar 5to orden	-0.01	0	-0.01	-0.01
13	Coma par 5to orden	0.01	0.01	0.02	0
14	Coma impar 5to orden	0.02	0.01	0.03	0.01
15	Aberración esférica 5to orden	-0.01	0.03	0.02	-0.04
16		0.01	0	0.01	0.01
17		0.01	0.01	0.02	0
18		0	0	0	0
19		0	0	0	0
20	Astigmatismo par 7mo orden	0.01	0.01	0.02	0
21	Astigmatismo impar 7mo orden	0	0	0	0
22	Coma par 7mo orden	0	0	0	0
23	Coma impar 7mo orden	0.01	0.01	0.02	0
24	Aberración esférica 7mo orden	-0.01	0.02	0.01	-0.03

Se puede ver que la mayoría de los valores mostrado en la tabla 4.4 se encuentran dentro del rango del valor mínimo y máximo esperado.

En la figura 4.4 se observan los mapas de Diferencia de Camino Óptico reconstruidos para una pupila normalizada, usando el método de Mínimos Cuadrados para cada una de las 8 pruebas, quitando los primeros 4 términos de los polinomios de Zernike.

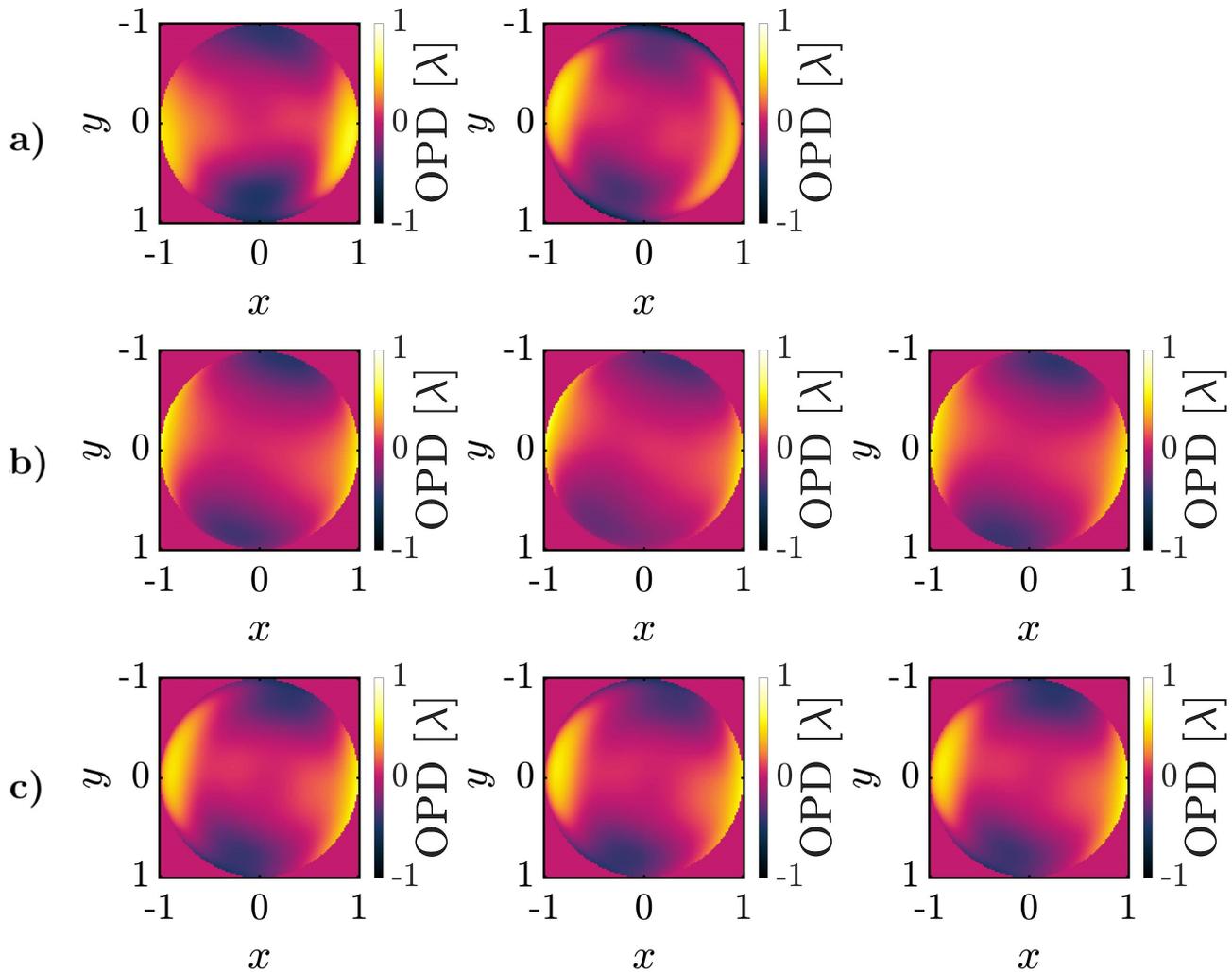


Figura 4.4: Mapas OPD reconstruidos con el método de mínimos cuadrados, omitiendo los términos de pistón, inclinación en el eje vertical y horizontal y defoco. Fila a) 17 marzo 2020, fila b) 14 octubre 2020 y fila c) 3 marzo 2021. En la barra de colores, los valores negativos representan niveles en la superficie por debajo de la referencia y los positivos niveles por arriba de la referencia.

Observando los mapas de OPD de las 8 diferentes pruebas, tanto del algoritmo de mínimos cuadrados como el de SSPCA, se puede observar que la superficie bajo prueba tiene una forma que se asemeja a un paraboloides hiperbólico.

En la figura 4.5 se observan los mapas de Diferencia de Camino Óptico reconstruidos para una pupila normalizada, usando el algoritmo de SSPCA 8x8 para cada una de las 8 pruebas, quitando los primeros 4 términos de los polinomios de Zernike.

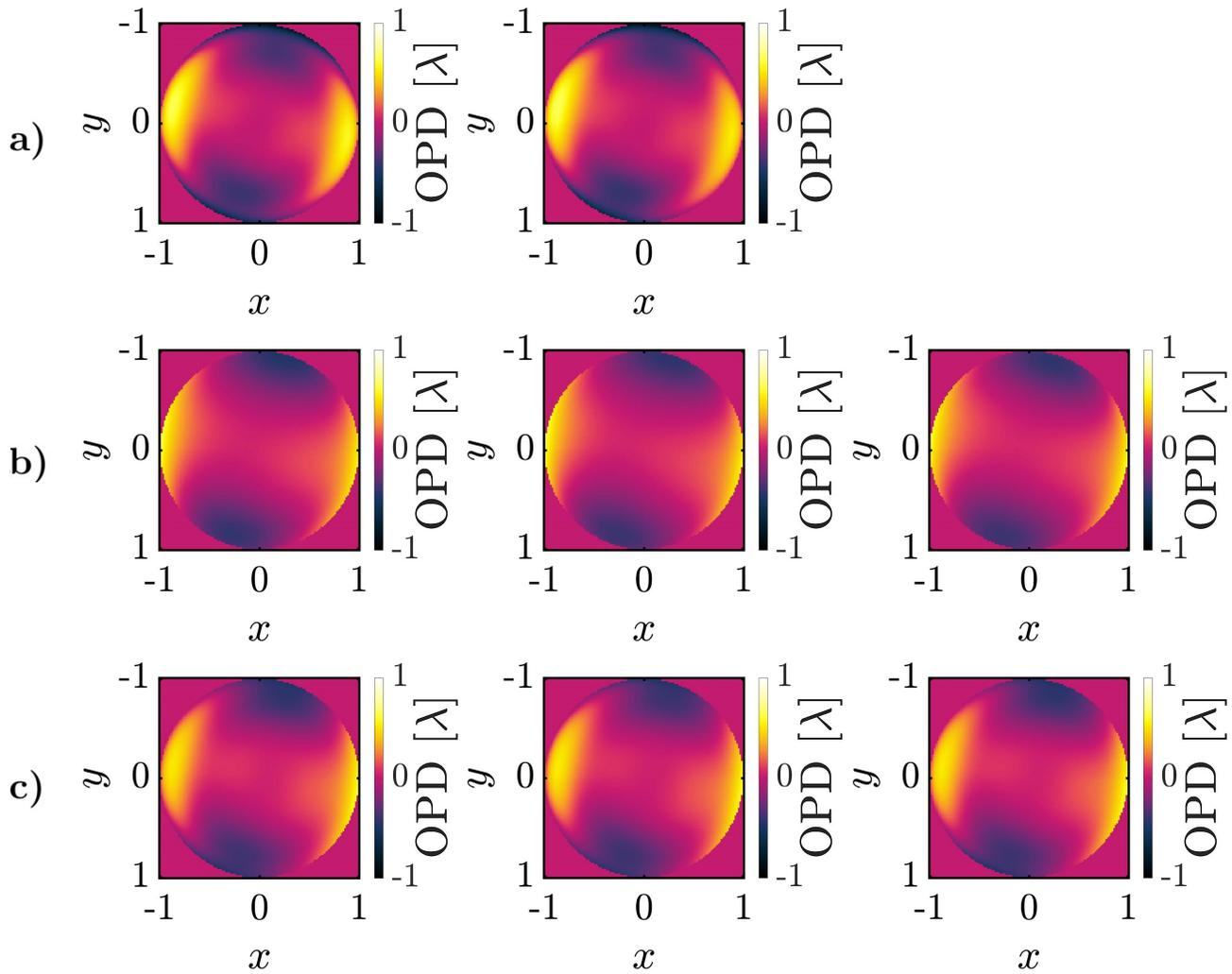


Figura 4.5: Mapas OPD reconstruidos con el algoritmo de SSPCA 8x8, omitiendo los términos de pistón, inclinación en el eje vertical y horizontal y defoco. Fila a) 17 marzo 2020, fila b) 14 octubre 2020 y fila c) 3 marzo 2021. En la barra de colores, los valores negativos representan niveles en la superficie por debajo de la referencia y los positivos niveles por arriba de la referencia.

## 4.2. Conclusiones

Se construyó un Interferómetro de Fizeau y se desarrolló un sistema de control para manejarlo, quedando así un instrumento funcional en el Laboratorio Universitario de Fabricación de Equipos Ópticos. Este instrumento óptico se usará para probar la forma de la superficie de elementos ópticos planos, con el fin medir sus defectos, teniendo la ventaja de un costo mucho menor a un interferómetro comercial.

Automatizar la adquisición de datos presenta evidentes ventajas como la reducción del tiempo de captura de los interferogramas, lo que antes tardaba 10 minutos ahora toma alrededor de 40 segundos; elimina los errores provocados por el operador y evita introducir más vibraciones y turbulencias al capturar los datos. Otra ventaja del sistema de control es que se implementaron rutinas que antes no podrían realizarse.

El sistema puede expandirse y se espera que, en una segunda versión, la rutina del análisis de los interferogramas con PSI implementado en MATLAB, pueda ejecutarse desde la misma aplicación.

El control del interferómetro y análisis de los datos capturados, aun presentan restricciones como que únicamente puede ser ejecutados desde una computadora que tenga instalados los softwares LabVIEW y MATLAB.

Al capturar los interferogramas, la luz del LUFABEO debe permanecer apagada en todo momento, para poder visualizar con mayor nitidez el patrón de interferencia. Por esta cuestión es conveniente que el interferómetro se coloque dentro de una caja negra, así también se evitaría que los componentes ópticos se ensucien o puedan ser movidos, causando la desalineación del interferómetro.

Los coeficientes de los polinomios de Zernike de las 8 pruebas diferentes presentan valores similares entre sí, de igual manera con los mapas de OPD se puede verificar que se recupera la misma forma de la superficie, con lo cual se concluye que es posible obtener resultados repetibles. Cabe mencionar que las condiciones de los 3 días en que fueron capturados los interferogramas eran diferentes, por ejemplo, el tiempo de exposición de la cámara y el número de franjas en el interferograma.

El algoritmo de SSPCA funciona mejor que el de mínimos cuadrados, ya que este último llega a tener resultados diversos cuando hay muchos interferogramas, pues se hace más evidente el grado de inclinación que hay entre la superficie de prueba y la placa interferométrica.

# Bibliografía

- [1] D. Malacara. *Optical Shop Testing*. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, 3rd edition, 2007.
- [2] E. Hecht. *Optics*. Addison Wesley, San Francisco, CA, 4th edition, 2002.
- [3] P. Hariharan. *Basics of Interferometry*. Elsevier, USA, 2nd edition, 2007.
- [4] THORLABS. *Kinesis LabView Guide*.
- [5] M. Servín D. Malacara and Z. Malacara. *Interferogram Analysis For Optical Testing*. Taylor & Francis, Boca Raton, FL, 2nd edition, 2005.
- [6] J. E. Greivenkamp. Generalized data reduction for heterodyne interferometry. *Optical Engineering*, 23(4):350–352, 1984.
- [7] S. Yang, W. Zhao, L. Qiu, Y. Wang, and S. Tian. Fast and accurate tilt-shift-immune phase-shifting algorithm based on self-adaptive selection of interferogram subblocks and principal component analysisdecomposition principle for linear programs. *Applied Optics*, 59(9), 2020.
- [8] D. Malacara and B. J. Thompson. *Handbook of Optical Engineering*. Optical engineering. Marcel Dekker, New York, 2001.
- [9] C. Zuo and L. Huang. Phase shifting algorithms for fringe projection profilometry: A review. *Optics and Lasers in Engineering*, 2018.
- [10] J. A. Moreno-Larios. *Modelling and measurement of wavefront aberration using zernike polynomials for its application to the focusing of femtosecond laser pulses*. PhD thesis, Universidad Nacional Autónoma de México, 2021.
- [11] D. Ghiglia and L. Romero. Robust two-dimensional weighted and unweighted phase unwrapping that uses fast transforms and iterative methods. *Journal of the Optical Society of America A*, 11(1), 1994.
- [12] V. Mahajan. *Optical Imaging and Aberrations, Part III: Wavefront Analysis*. SPIE, Washington USA, 2013.
- [13] J. Rayces. Synthesis and analysis of wavefront error with zernike coefficients using square grids. 1999.
- [14] D. Malacara. *Óptica Básica*. Ediciones Científicas Universitarias. Fondo de Cultura Económica, México, 3rd edition, 2015.
- [15] Hank H. Karow. *Fabrication Methods for Precision Optics*. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, 2004.

- 
- [16] René Schödel. *Modern Interferometry for Length Metrology*. IOP, Bristol, UK, 2018.
  - [17] E. P. Goodwin and J. C. Wyant. *Field Guide to Interferometric Optical Testing*. The International Society for Optical Engineering, Washington, USA, 2006.
  - [18] J. Vargas, J.A. Quiroga, and T. Belenguer. Phase-shifting interferometry based on principal component analysis. *Optics Letters*, 36(8), 2011.
  - [19] J. Vargas, J.A. Quiroga, and T. Belenguer. Analysis of the principal component algorithm in phase-shifting interferometry. *Optics Letters*, 36(12), 2011.

# Apéndice A

## Elementos utilizados para la construcción del Interferómetro de Fizeau

Tabla A.1: Elementos utilizados para la construcción del Interferómetro de Fizeau, con marca, modelo y precio.

Elemento	Precio por unidad USD	Unidades	Total USD	Marca	Empresa	Modelo
Panel óptico 897 mm x 1197 mm x 50 mm	\$1,974.00	1	\$1,974.00	TMC	Edmund Optics	55-253
Láser He-Ne estabilizado 1 mW, 632.8 nm	\$7,916.60	1	\$7,916.60	REO	Newport	R-32734
Poste para láser 1.5" x 12"	\$209.93	1	\$209.93	Thorlabs	Thorlabs	DP12A/M
Montaje de abrazadera en V	\$272.69	1	\$272.69	Thorlabs	Thorlabs	C1513/M
Objetivo de microscopio 40/0.66 $\infty$ /0.17	\$99.00	1	\$99.00	Edmund Optics	Edmund Optics	43-904
Movimiento para filtro espacial	\$450.00	1	\$450.00	Edmund Optics	Edmund Optics	39-976
Pinhole 15 $\mu$ m	\$58.5.00	1	\$58.5.00	Edmund Optics	Edmund Optics	38-540
Divisor de haz 76.2 mm, $\lambda$ /20	\$1,080.00	1	\$1,080.00	Newport	Newport	30Q40BS.1
Montura para el divisor de haz 3"	\$196.73	1	\$196.73	ULTIMA	Newport	U300-A
Tornillo de ajuste 12.7 mm	\$35.12	3	\$105.36	Newport	Newport	AJS100-0.5K
Base de montaje 2" x 3" x 3/8"	\$6.77	10	\$67.68	Thorlabs	Thorlabs	BA2/M-P5
Poste óptico	\$8.45	9	\$76.05	Thorlabs	Thorlabs	MS3R
Soporte para poste 4"	\$9.45	9	\$85.05	Thorlabs	Thorlabs	PH4
Tornillos 20 mm x 5 mm	\$3.54	24	\$85.01	Thorlabs	Thorlabs	SH6MS20V
Doblete acromático 50.8 mm, 500 mm EFL	\$201.00	1	\$201.00	Newport	Newport	PAC091AR.14
Monturas de lentes 2"	\$25.95	2	\$51.90	Thorlabs	Thorlabs	LMR2-P5
Interferómetro de desplazamiento lateral	\$847.30	1	\$847.30	Thorlabs	Thorlabs	SI500
Placa interferométrica 50.8 mm, 12.7 mm Thick, $\lambda$ /10	\$472.00	1	\$472.00	Newport	Newport	20QB20
Superficie de prueba	\$0.00	1	\$0.00			
Montaje de espejo cinemático 1"	\$39.86	2	\$79.72	Thorlabs	Thorlabs	KM100
Perilla de ajuste extraíble	\$2.66	4	\$10.64	Thorlabs	Thorlabs	F25SSK1
Platina de desplazamiento micrométrico	\$705.54	1	\$705.54	Thorlabs	Thorlabs	LNR25M
Placa de montaje para la platina	\$101.46	1	\$101.46	Thorlabs	Thorlabs	LNR25P1
Actuador motorizado paso a paso	\$1,058.31	1	\$1,058.31	Thorlabs	Thorlabs	ZST225B
Controlador de motor paso a paso	\$677.41	1	\$677.41	Kinesis	Thorlabs	KST101
Fuente de alimentación 15 V, 2.4 A	\$35.36	1	\$35.36	Thorlabs	Thorlabs	KPS101
Cámara monocromática	\$495.00	1	\$495.00	FLIR	Edmund Optics	BFS-U3-13Y3M-C
Cable USB tipo A 3.0 a micro USB tipo B 3.0, 1.8 m	\$10.61	1	\$10.61	Steren	Steren	USB-392
Montura para la cámara	\$0.00	1	\$0.00			
Tornillo para la montura de la cámara	\$0.00	1	\$0.00			
<b>Total USD</b>			<b>\$17,422.85</b>			

Nota: Los precios son del año 2019.

# Apéndice B

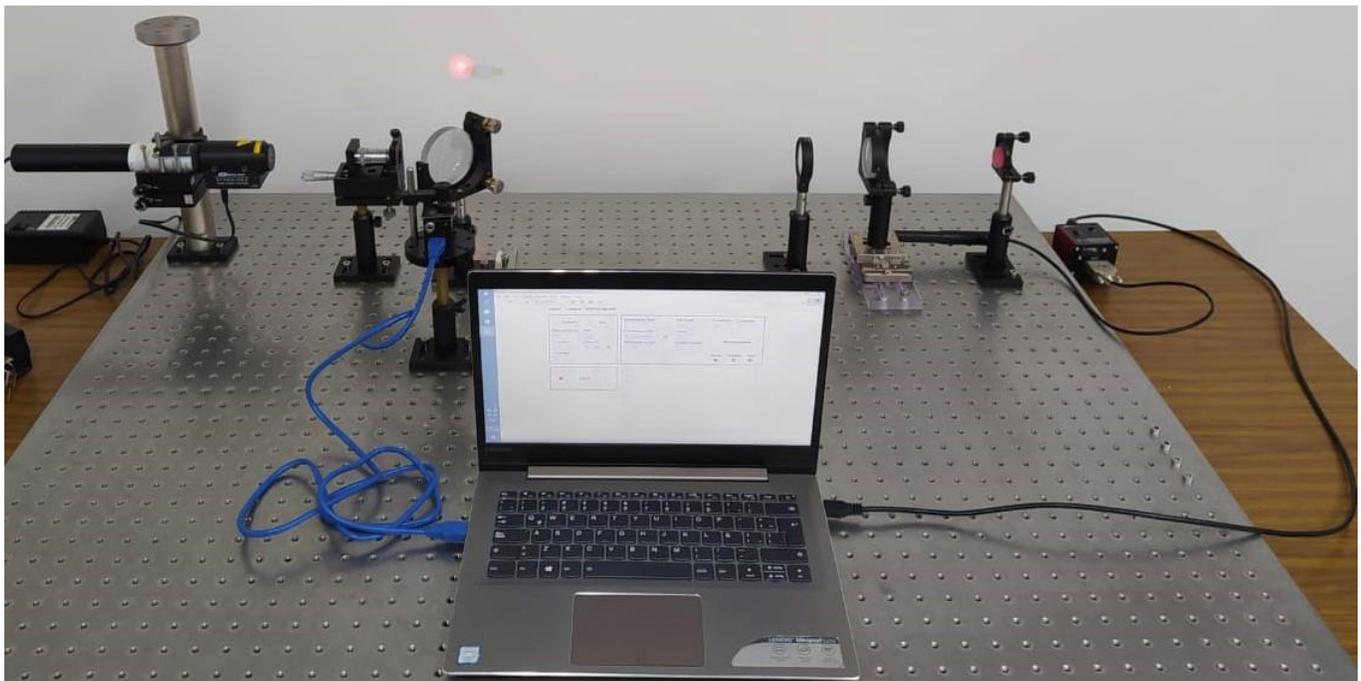
## Manual de usuario para el Sistema de Control del Interferómetro de Fizeau

A continuación, se presenta un Manual de Usuario, el cual se entregará junto con el Sistema de Control del Interferómetro de Fizeau, con la finalidad de guiar al operador, presentando conceptos y funciones básicas, respondiendo dudas y ejemplificando la adquisición del interferogramas y el análisis de estos con PSI.



Instituto de Ciencias  
Aplicadas y Tecnología

# Sistema de Control del Interferómetro de Fizeau Manual de usuario



Laboratorio Universitario de Fabricación de Equipos Ópticos  
(LUFABEO)

Rosa Alejandra Ramírez Ramírez

# Contenido

<b>1. Introducción.....</b>	<b>1</b>
<b>2. Requisitos previos para usar el sistema .....</b>	<b>1</b>
<b>2.1 Conocimientos mínimos del usuario .....</b>	<b>1</b>
2.1.1 Interferómetro de Fizeau .....	1
2.1.2 Interferometría por desplazamiento de fase .....	3
<b>2.2 Software complementario MATLAB .....</b>	<b>4</b>
<b>2.3 Instalación y configuración de SCIF.....</b>	<b>4</b>
<b>3. Funciones básicas del Sistema de Control del Interferómetro de Fizeau .....</b>	<b>10</b>
<b>3.1 Motor .....</b>	<b>11</b>
<b>3.2 Cámara .....</b>	<b>13</b>
<b>3.3 Interferogramas .....</b>	<b>15</b>
<b>4. Ejemplo para obtener una serie de interferogramas y extraer la fase con MATLAB .....</b>	<b>17</b>
<b>5. Interferometría por Desplazamiento de Fase con MATLAB.....</b>	<b>20</b>
<b>6. Solución a posibles problemas .....</b>	<b>23</b>
<b>7. Preguntas frecuentes y datos de contacto .....</b>	<b>26</b>
<b>8. Referencias.....</b>	<b>28</b>

## **1. Introducción**

El Interferómetro de Fizeau del Laboratorio Universitario de Fabricación de Equipos Ópticos (LUFABEO), es un instrumento óptico destinado a medir la forma de la superficie de elementos ópticos planos, con el fin determinar sus defectos.

El sistema se compone del Interferómetro de Fizeau con un haz de salida colimado de 2 pulgadas y el control para la adquisición de interferogramas.

SCIF (Sistema de Control del Interferómetro de Fizeau) es una interfaz de usuario desarrollada en LabVIEW, que permite configurar el motor, la cámara y los parámetros de guardado de imágenes. Fue desarrollado para capturar interferogramas de manera automática, rápida y sencilla, sin la necesidad de manejar cada uno de los elementos del interferómetro por separado, permitiendo así su optimización.

En este manual se presenta la primera versión desarrollada de SCIF. Leer el manual le dará al usuario los conocimientos necesarios para manejar correctamente el sistema, también le ayudará a resolver dudas de operación y dar solución a posibles problemas que puedan presentarse.

## **2. Requisitos previos para usar el sistema**

### **2.1 Conocimientos mínimos del usuario**

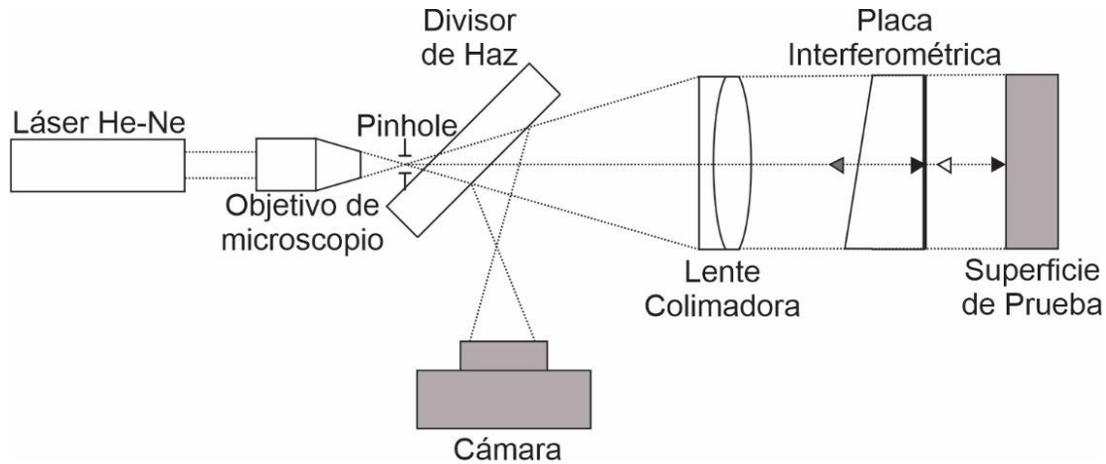
#### **2.1.1 Interferómetro de Fizeau**

Es importante saber cómo funciona un interferómetro de Fizeau para que el usuario pueda operar el instrumento.

El interferómetro de Fizeau es una de las herramientas de metrología más utilizada en pruebas ópticas. Es un interferómetro en donde los haces de prueba y de referencia viajan por el mismo camino y gracias a la diferencia entre las trayectorias es que se forma un patrón de interferencia.

En este interferómetro la fuente de luz es un láser de He-Ne, el haz del láser pasa a través de un sistema conocido como filtro espacial, el cual está formado por un objetivo de microscopio y una abertura circular, este sistema es usado comúnmente para "limpiar" el haz que sale del láser, primero el haz es enfocado con el objetivo de microscopio, lo cual

además produce una fuente puntual y con la abertura circular se eliminan los anillos secundarios generados por difracción al haber enfocar el haz.



*Ilustración 1 Esquema del Interferómetro de Fizeau*

Los rayos que divergen llegan a una lente la cual los colima, es decir, convierte a todos los rayos del haz divergente en un conjunto de rayos paralelos entre sí, y el frente de onda que antes era esférico se vuelve plano.

El haz colimado pasa por la placa interferométrica y se refleja en la superficie de prueba. La placa interferométrica tiene una cuña en una de sus caras, que desvía la luz de la trayectoria original. La cuña debe colocarse hacia el filtro espacial. La luz que se refleja en la segunda cara de la placa interferométrica, la que está más cerca de la superficie bajo prueba, es la que genera el haz de referencia, este haz reflejado es el que interfiere con el haz que proviene de la superficie bajo prueba. La ilustración 1 no se dibujó a escala, con el fin de mostrar cuál de las dos caras de la placa tiene la cuña y cuál es la que produce el frente de onda de referencia, pero en la placa interferométrica real no se puede ver a simple vista cual es la superficie que tiene la cuña, por lo que es necesario observar la reflexión de las dos superficies para identificarla.

La lente también sirve para concentrar la luz que viaja de regreso hacia el plano de observación. En la ilustración 1, la flecha blanca representa el rayo reflejado de la superficie bajo prueba y la flecha gris representa el rayo reflejado de la placa interferométrica. El haz que regresa se refleja en el divisor de haz para finalmente llegar al plano de observación. En el interferómetro construido, la cámara CMOS se coloca en este plano de observación para capturar los interferogramas.

Con este interferómetro se puede evaluar la calidad de muchos elementos ópticos diferentes. Incluyendo placas transparentes para comprobar paralelismo y homogeneidad; también es posible probar superficies cóncavas y convexas, haciendo las modificaciones adecuadas al interferómetro.

### 2.1.2 Interferometría por desplazamiento de fase

Para analizar los interferogramas obtenidos, se usa una técnica llamada Interferometría por Desplazamiento de Fase (PSI – *phase shifting interferometry*), consiste en capturar electrónicamente una serie de interferogramas cambiando la fase en cada uno de ellos. PSI permite recuperar la fase del frente de onda, que se encuentra codificada en las variaciones de intensidad en el patrón de interferencia.

En un patrón de interferencia, la única cantidad que se puede medir es la irradiancia, la cual es registrada con la cámara CMOS y almacenada en formato digital. La cámara registra la intensidad con valores discretos en escala de grises en una matriz de  $M \times N$  puntos llamados píxeles.

Existen diversos métodos para producir el cambio de fase necesario para poder aplicar el algoritmo PSI. En este interferómetro, lo que se hace es trasladar la placa interferométrica (superficie de referencia), por medio de una platina la cual es desplazada por un actuador motorizado que a su vez es controlado por un motor a pasos, como se muestra en la ilustración 2. De esta manera se puede incluir un cambio de fase, al modificar la diferencia entre las trayectorias de los dos haces.

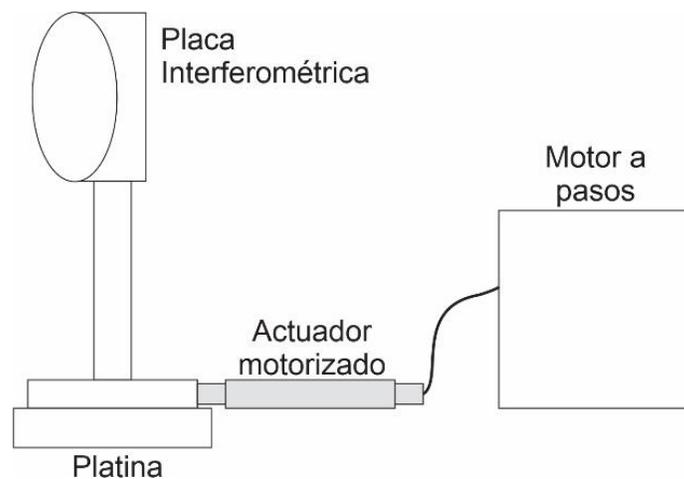


Ilustración 2 Sistema de cambio de fase

Existen diferentes métodos para extraer la fase del frente de onda, el que se use depende de cada aplicación en particular. Todos los algoritmos requieren registrar una serie de interferogramas variando la fase. Se necesita un mínimo de 3 patrones de interferencia diferentes para evaluar la fase deseada.

Independientemente de los algoritmos que se hayan usado para la extracción de fase, siempre habrá errores en los datos. Los errores pueden deberse a diversos factores y los podemos dividir en tres categorías:

- 1) Proceso de captura de los datos.
- 2) Factores ambientales como vibración y turbulencia.
- 3) Defectos en el diseño y fabricación de las componentes e instrumentos utilizados.

## 2.2 Software complementario MATLAB

Para extraer la fase de los interferogramas adquiridos con SCIF, se implementaron dos algoritmos 1) Análisis por mínimos cuadrados [1] y 2) Selección Autoadaptativa de Subbloques del Interferograma y Análisis de Componentes Principales (SSPCA), los cuales fueron implementados en MATLAB. [2]

MATLAB (*MATrix LABoratory*, laboratorio de matrices) es un software de MathWorks. Este sistema de cómputo numérico brinda un entorno de desarrollo integrado (IDE) con un lenguaje de programación M, el cual es un lenguaje propio del sistema. Este lenguaje de programación puede ejecutarse a través del entorno interactivo, y por medio de un archivo script (archivos \*.m).

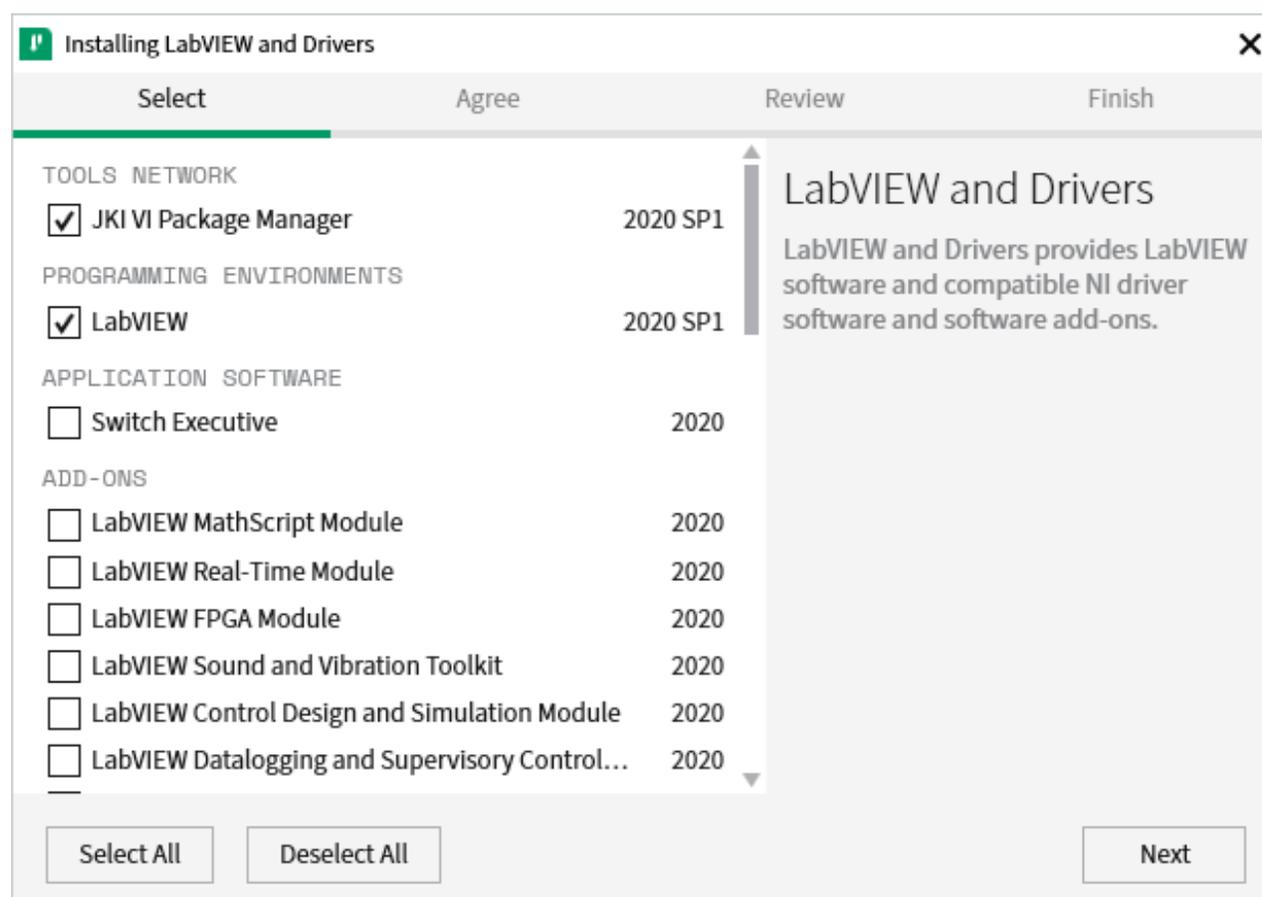
MATLAB está disponible para las plataformas Unix, Windows, macOS y GNU/Linux. Este software permite cálculos con funciones, vectores, matrices, así como manipulación de cálculo lambda y programación orientada a objetos.

## 2.3 Instalación y configuración de SCIF

Para que el Sistema de Control del Interferómetro de Fizeau pueda ser utilizado, es necesario que el equipo de cómputo tenga instalado LabVIEW, el cual es un software de ingeniería con entorno de desarrollo gráfico para diseñar sistemas de hardware y software, para controlar y simular aplicaciones que requieren pruebas, medidas e información de datos.

LabVIEW puede ser descargado desde la página oficial de National Instruments ([www.ni.com/es-mx/shop/labview.html](http://www.ni.com/es-mx/shop/labview.html)), siendo posible obtenerlo de forma gratuita mediante un periodo de prueba (creando una cuenta de usuario), o bien, adquiriendo una licencia. En la página se pueden encontrar diferentes versiones de LabVIEW, para Windows, Mac OS y Linux, tanto para 32 como para 64 bits, en 6 diferentes idiomas.

Una vez descargado LabVIEW, la instalación es muy sencilla, únicamente se tendrán que seguir los pasos que el mismo archivo ejecutable (.exe), irá indicando. La mayoría de las funciones básicas, están marcadas por defecto.



*Ilustración 3 Ventana que abre el .exe para instalar LabVIEW*

Una vez que se haya instalado LabVIEW de manera correcta, será necesario descargar e instalar dos aplicaciones (funciones complementarias de LabVIEW), las cuales se pueden descargar de igual manera de la página oficial de National Instruments, contando así mismo, con un periodo de prueba.

Estas dos aplicaciones son: 1) Vision Acquisition Software y 2) Vision Development Module.

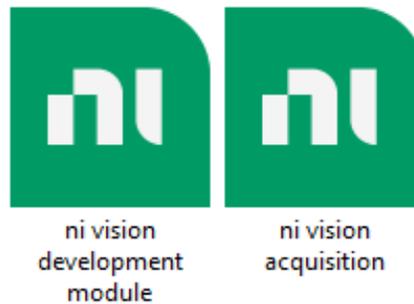


Ilustración 4. Icono de las funciones complementarias de LabVIEW

Una vez instaladas las funciones complementarias, resta realizar una serie de pasos para configurar SCIF, los cuales se describen a continuación.

- 1) Abrir la carpeta llamada *Software\_Fizeau*.

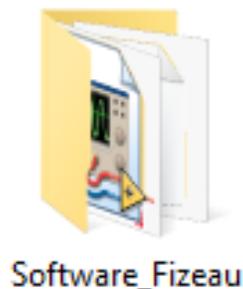


Ilustración 5 Carpeta que contiene el sistema de control del interferómetro de Fizeau

- 2) Una vez dentro de la carpeta se encontrará un proyecto de LabVIEW llamado *Software\_Fizeau*, el cual se tiene que abrir.

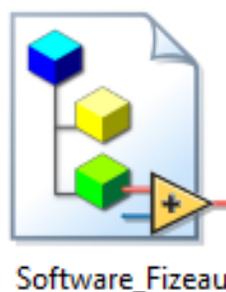


Ilustración 6. Icono proyecto en LabVIEW

3) Dentro del proyecto se encontrará un archivo llamado *Software\_Fizeau* con extensión *.vi*, en este archivo se encuentra el Sistema de Control del Interferómetro de Fizeau. Una vez abierto, se mostrará una pantalla como la presentada en la ilustración 8.

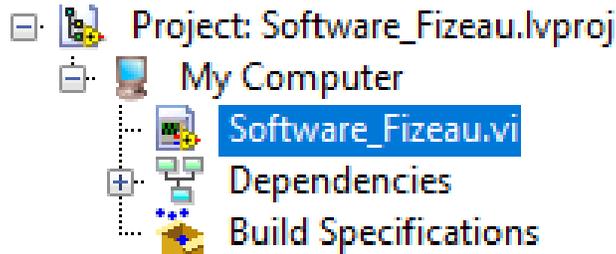


Ilustración 7 Pantalla que se muestra al abrir el proyecto *Software\_Fizeau*

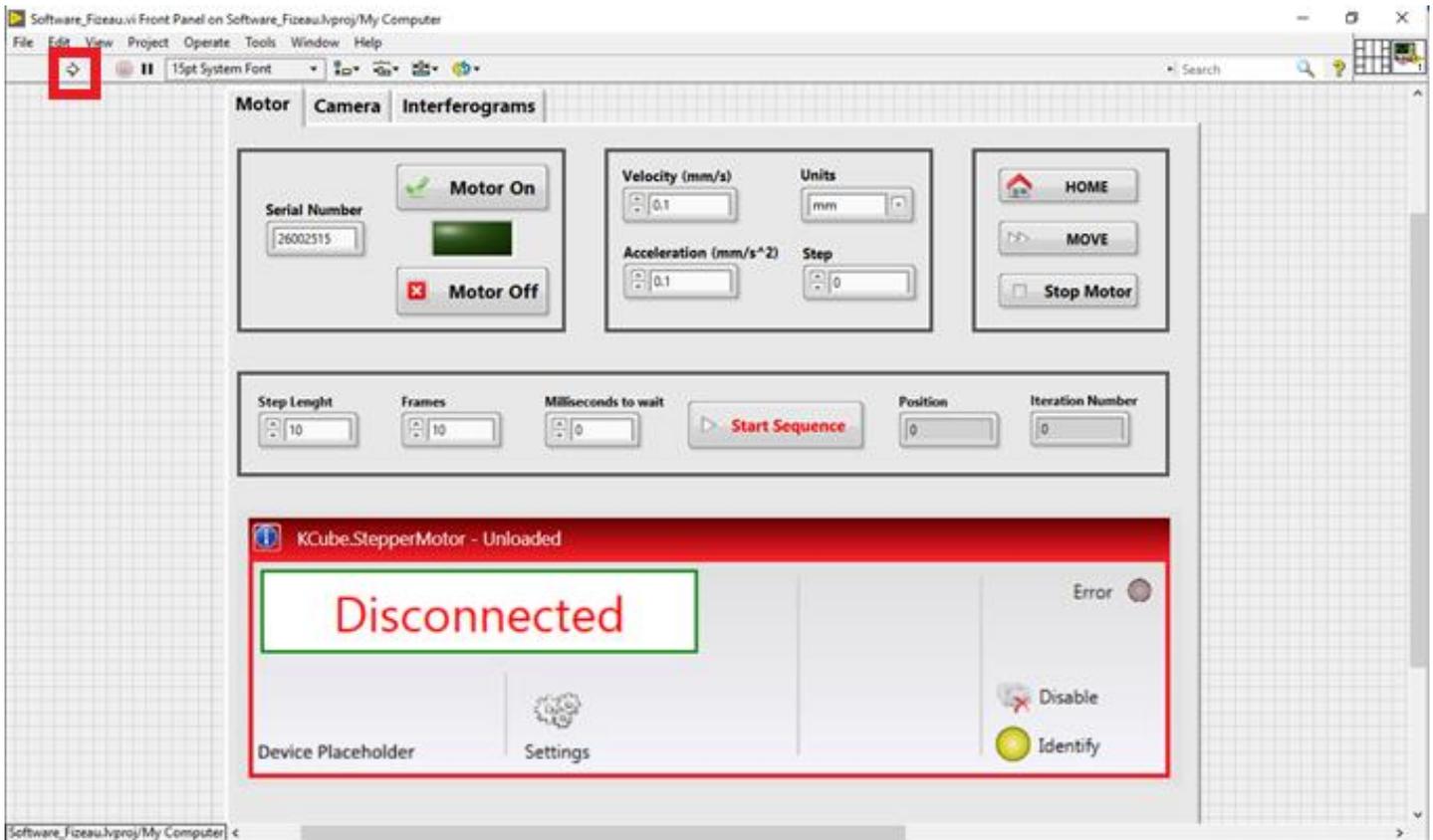


Ilustración 8. Ventana de SCIF

- 4) Una vez que se muestre la pantalla de la ilustración 8, apretar *Ctrl + t*, de esta manera se abrirá otra ventana. Es en esta ventana donde nos dirigiremos a la sección mostrada en la ilustración 9, para cambiar la ruta de una subVI.



Ilustración 9. Sección donde se modificará la ruta

- 5) La única parte que se modificará es la señalada en la ilustración 10, donde se indica la ruta a modificar. Se cambiará por la ruta donde se encuentra ubicada la carpeta llamada *Software\_Fizeau* (ilustración 5), el resto se deja igual.

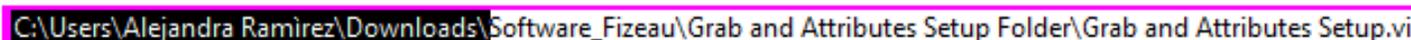


Ilustración 10. Selección de la ruta a modificar

- 6) Finalmente, guardar todo y cerrar únicamente la ventana donde se modificó la ruta. En la ventana mostrada en la ilustración 8, en la parte superior izquierda, se encuentra una flecha color blanca para ejecutar SCIF. Al dar clic en la flecha, empezara a correr SCIF.

Estos 6 pasos enumerados se realizarán una única vez, siempre y cuando la carpeta *Software\_Fizeau* no cambie de dirección. Cada que se requiera usar SCIF, es necesario abrir *Software\_Fizeau.vi* desde el proyecto, de lo contrario saldrá un error al intentar manejar el motor. Para su correcta ejecución, se recomienda abrir SCIF siguiendo los pasos anteriores a excepción de 4) y 5), pues estos son únicamente para su configuración.

Junto con LabVIEW se instalará una aplicación llamada NI MAX, en la cual se va a verificar que la cámara CMOS esté siendo reconocida. Para ello, es necesario conectar la cámara a la computadora e indicar que se desea manejar con LabVIEW.

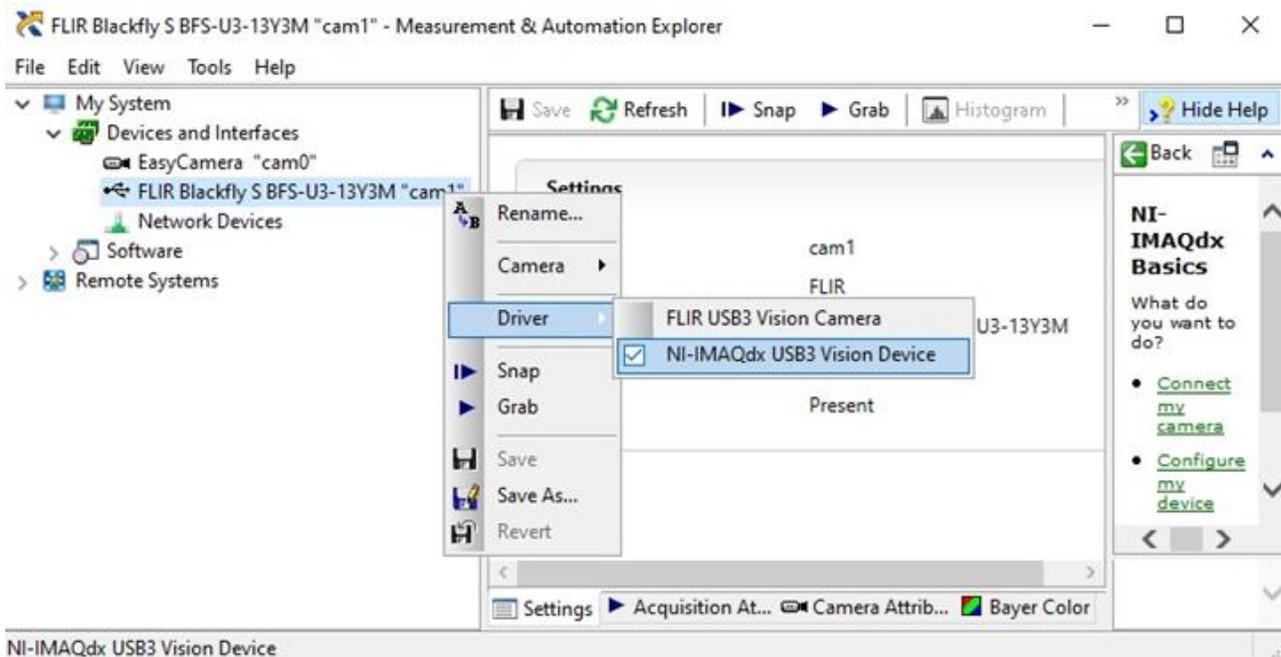


Ilustración 11 Ampliación NI MAX

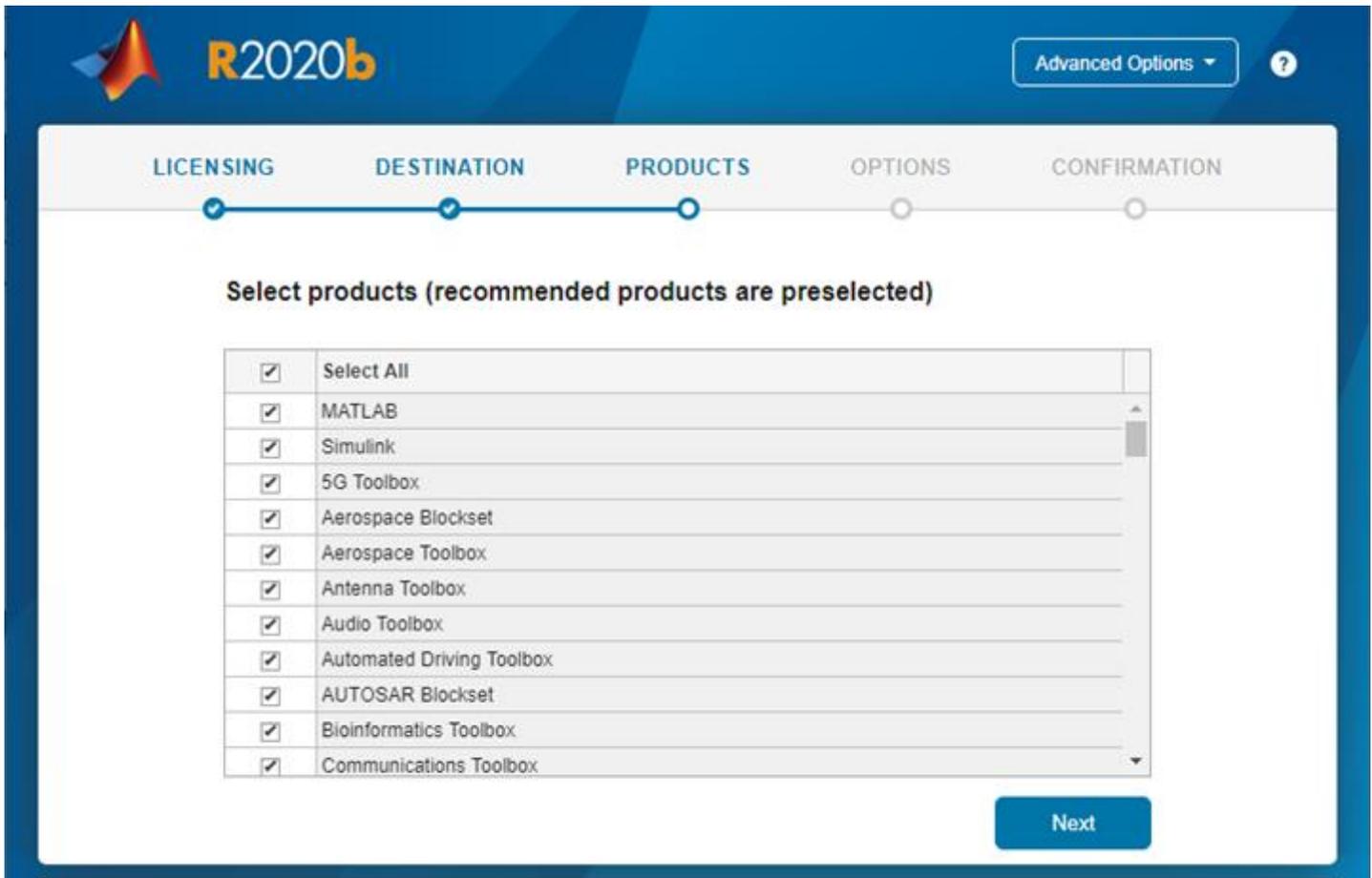
Una vez obtenidos los interferogramas con SCIF, es necesario procesarlos para extraer la fase, como se mencionó en la sección 2.1.2, la técnica que se usará será Interferometría por Desplazamiento de Fase, la cual fue implementada en MATLAB y utiliza algunas herramientas en específico de este software.

Si bien, podría ser bueno instalar MATLAB con todos sus productos, es demasiado tardado y ocupa mucha memoria en la computadora. Por ello, la recomendación es instalar solo los productos que utiliza el código de MATLAB para la extracción de la fase, los cuales son:

- 1) Image Processing Toolbox
- 2) Mapping Toolbox
- 3) Statistics and Machine Learning Toolbox

<input type="checkbox"/>	Select All
<input checked="" type="checkbox"/>	MATLAB
<input checked="" type="checkbox"/>	Mapping Toolbox
<input checked="" type="checkbox"/>	Image Processing Toolbox
<input checked="" type="checkbox"/>	Statistics and Machine Learning Toolbox

Ilustración 12 Selección solo de los productos recomendados para la extracción de la fase con PSI



*Ilustración 13 Instalación completa de todos los productos de MathWorks*

En resumen, el equipo de cómputo en el que será manejado SCIF, deberá tener instalado:

- 1) LabVIEW con Vision Acquisition Software y Vision Development Module.
- 2) MATLAB con las cajas de herramientas Image Processing, Mapping Toolbox y Statistics and Machine Learning.

### **3. Funciones básicas del Sistema de Control del Interferómetro de Fizeau**

SCIF cuenta con 3 ventanas, entre las que se puede navegar para manejar el motor a pasos, la cámara monocromática CMOS y la adquisición de interferogramas. A continuación, se describen las funciones que se utilizarán con más frecuencia.

### 3.1 Motor

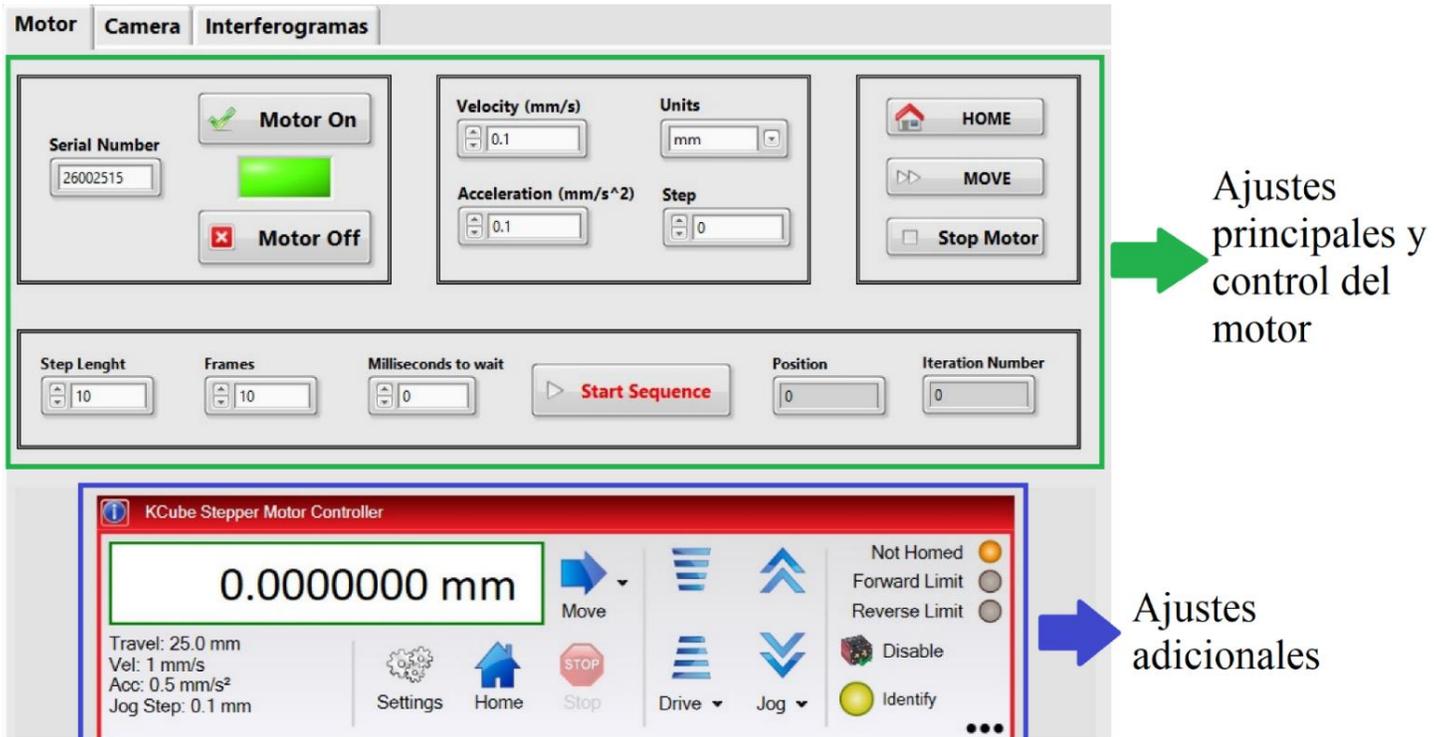


Ilustración 14 Interfaz gráfica SCIF, ventana de las funciones del Motor

Recordar que el motor controla un actuador, el cual mueve la platina de desplazamiento. Para que se pueda acceder a todas las funciones del motor de manera correcta, es necesario verificar 3 parámetros:

- 1) Asegurar que el motor esté conectado al tomacorriente, prendido y conectado a la computadora donde se encuentra SCIF.
- 2) Verificar que el *Serial Number* sea el correspondiente al número de serie del motor, esto se puede ver en la parte trasera del motor.
- 3) Antes de empezar a usar el motor, es necesario apretar el botón para encenderlo *Motor On*. Esto no sustituye a prenderlo de manera manual (lo que se menciona en el número 1) de esta lista).

El número de serie se encuentra en la parte trasera del motor

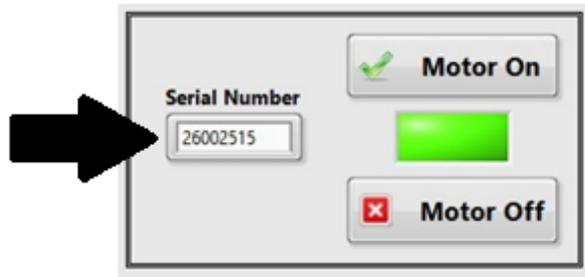


Ilustración 15 Número de serie del motor

En la sección mostrada en la ilustración 16, se presenta los ajustes de velocidad y aceleración y unidades del motor. Es recomendable dejar los valores que se encuentran por defecto.

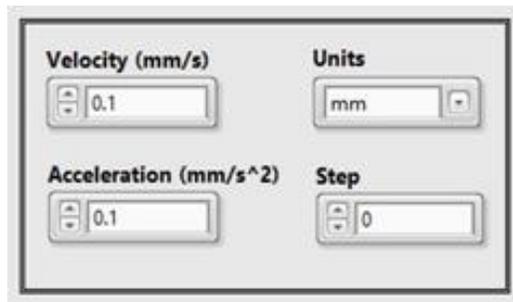


Ilustración 16. Sección de ajustes del motor

Las unidades del paso que se moverá la platina se pueden elegir entre milímetros, micrómetros y nanómetros.

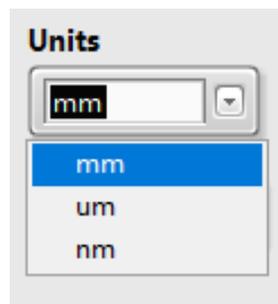


Ilustración 17 Unidades de los pasos del motor

El botón *HOME*, siempre lleva la platina a la misma posición inicial. Para empezar a mover la platina, es necesario apretar el botón *MOVE* y se moverá aquello que se encuentre indicando en *Step* (ilustración 16), respetando las unidades.

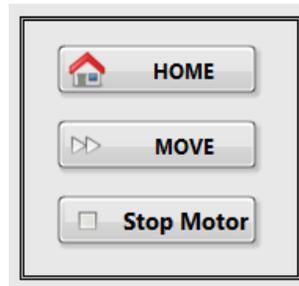


Ilustración 18. Mover, parar y llevar la platina a una posición inicial

*Ejemplo: La platina se moverá 100  $\mu\text{m}$ .*



Ilustración 19. Ejemplo para mover la platina 100  $\mu\text{m}$

La sección presentada en la ilustración 20 es para generar una secuencia de movimientos.

*Ejemplo: La platina se moverá 10 veces, con un paso de 10 unidades y se esperará 100 milisegundos entre cada iteración.*

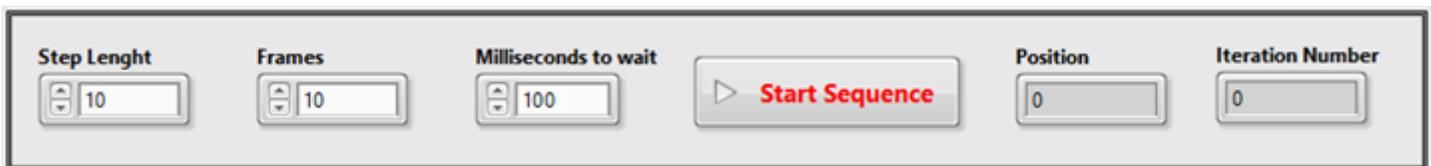


Ilustración 20 Sección del motor para generar una secuencia de movimiento

## 3.2 Cámara

El primer paso para usar la cámara es asegurar que el sistema la esté reconociendo. Las opciones a elegir dependerán de los dispositivos de video que se encuentren conectados a la computadora. Generalmente *cam0* corresponde a la cámara de la misma computadora (en caso de ser laptop). La cámara CMOS se prende automáticamente cuando esta se conecta a la computadora.

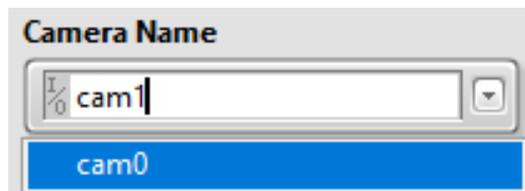


Ilustración 21 Selección de la cámara

La sección para ajustar la configuración de los parámetros de la cámara se presenta rodeado por un recuadro negro en la ilustración 22. Es en este apartado, donde se puede modificar todos los atributos de la cámara.

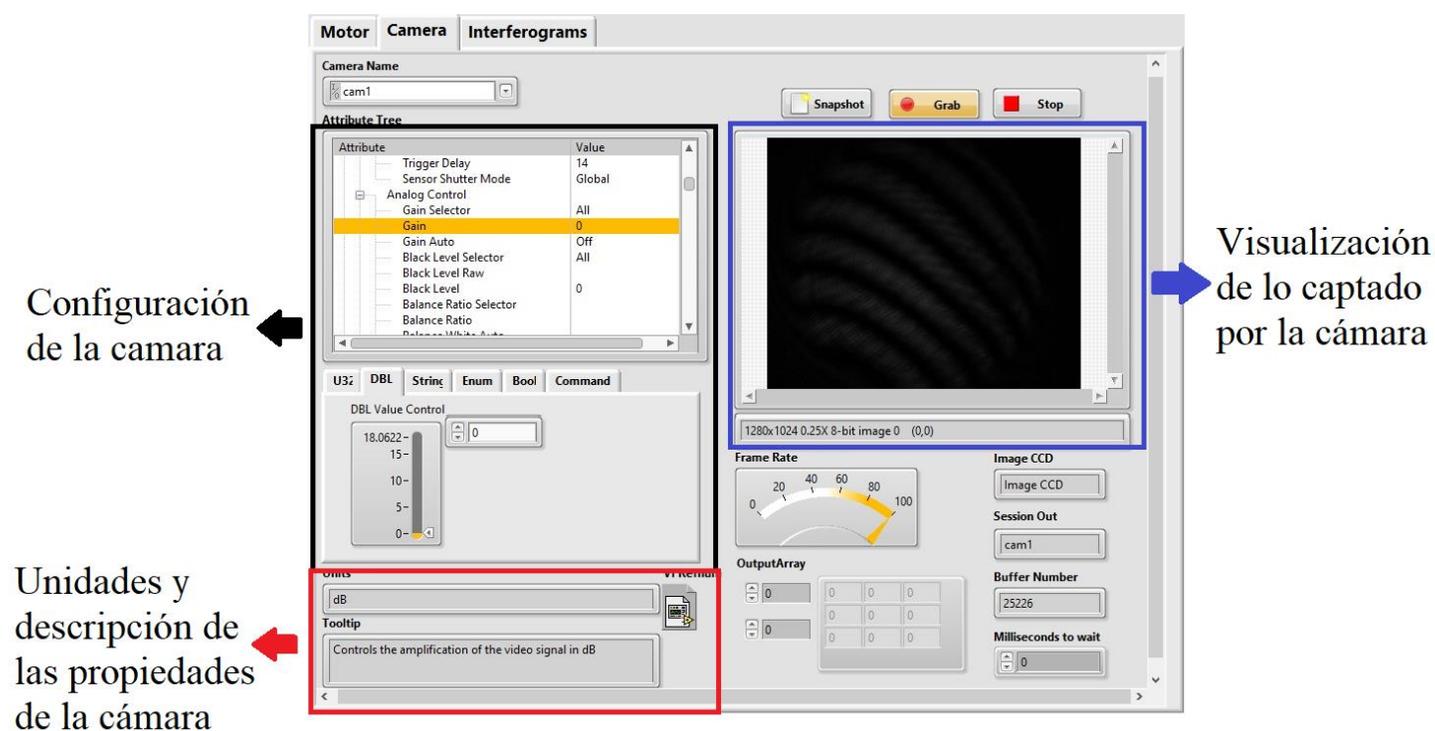


Ilustración 22 Interfaz gráfica SCIF, ventana de las funciones de la cámara

En la sección 4 de este manual *Ejemplo para obtener una serie de interferogramas y extraer la fase con MATLAB*, se hablará de cuáles son los parámetros más importantes a tomar en cuenta y la configuración recomendada en la cámara CMOS para la captura de interferogramas.

En la ilustración 23 se observan los 3 botones principales para manejar la cámara. *Grab* comienza a capturar la información que le esté llegando a la cámara, *Snapshot* pausa la

cámara y se queda con la última imagen capturada por la cámara y *Stop* detiene por completo la adquisición de información por la cámara.

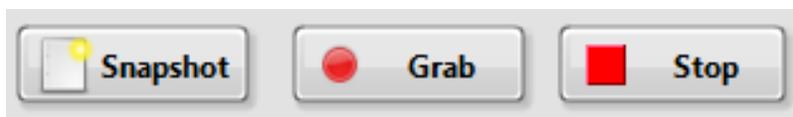


Ilustración 23 Botones principales de la cámara

### 3.3 Interferogramas

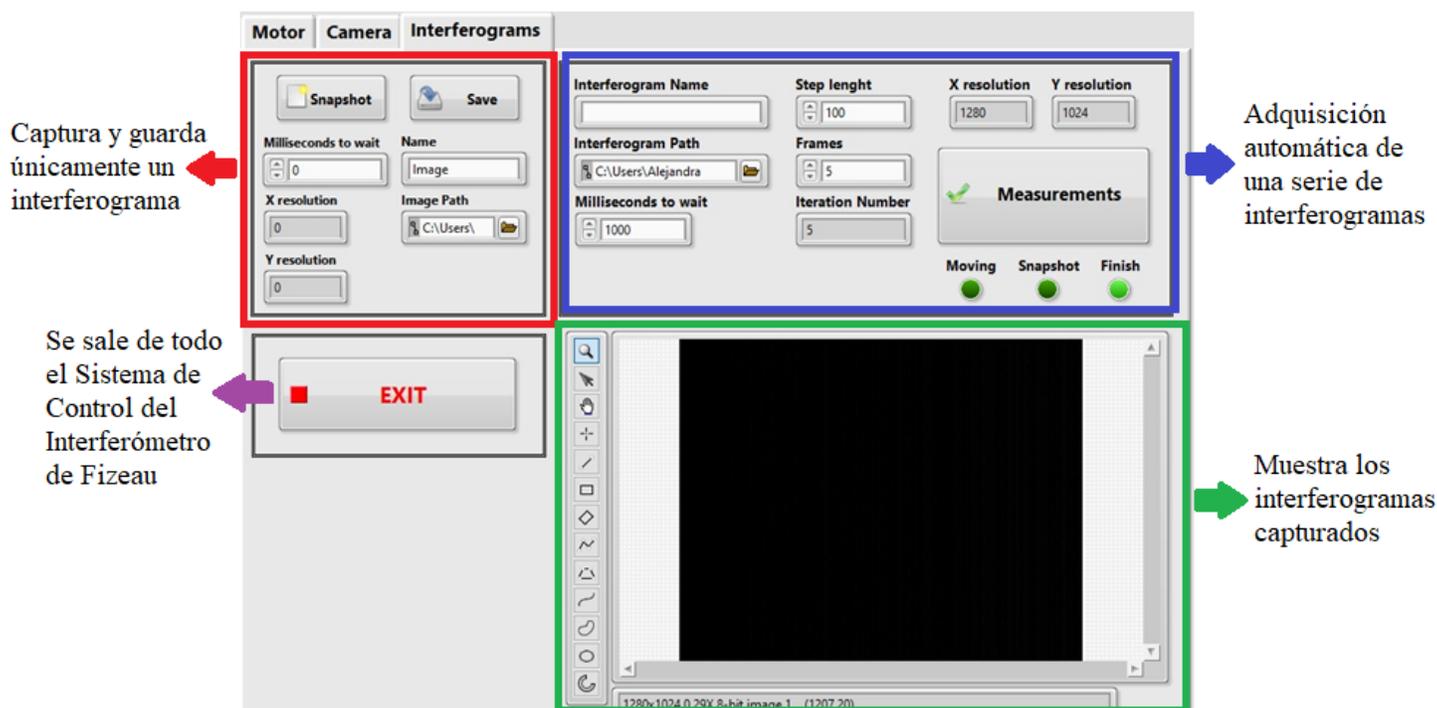


Ilustración 24 . Interfaz gráfica SCIF, ventana de la captura de una serie de interferogramas

La sección presentada en la ilustración 25 presenta la adquisición de un único interferograma, para ello es necesario indicar el nombre y la carpeta donde se quiera guardar, antes de apretar el botón *Save*, los interferogramas se guardan en un formato *BMP*. *Milliseconds to wait* sirve como retraso, se espera el tiempo indicado después de haber apretado el botón *Snapshot*, para obtener la imagen en la cámara CMOS.

*X resolution* y *Y resolution* indican el tamaño del interferograma el cual es de *1280x1024* pixeles, este no es un parámetro modificable.



Ilustración 25 Adquisidor de solo un interferograma

Para capturar una serie de interferogramas es necesario haber configurado previamente el motor y la cámara con los parámetros deseables. Se deberá indicar el nombre base de los interferogramas, SCIF añade el sufijo indicando el número de interferograma capturado. Si no se indica la carpeta de guardado, por defecto los archivos se quedarán en la carpeta donde esta guardado SCIF. Una vez indicado el tamaño del paso, el número de interferogramas y el tiempo de espera entre cada iteración, se debe apretar el botón *Measurements* para iniciar la captura de los datos.

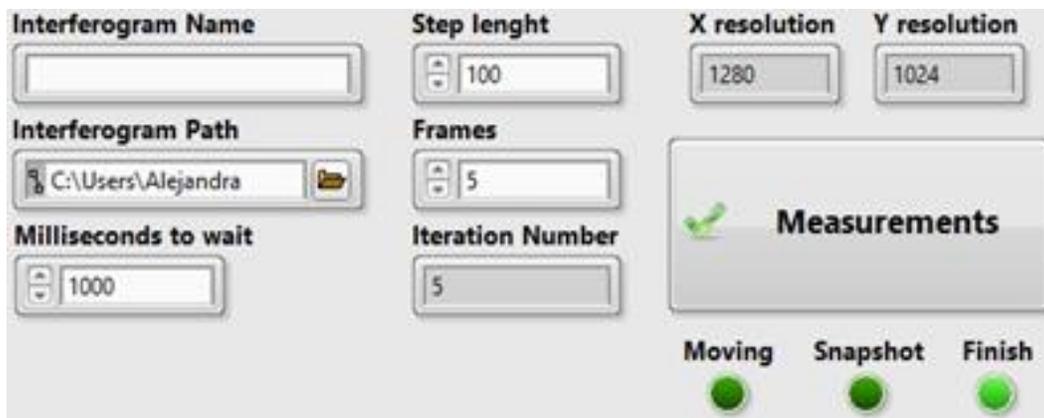
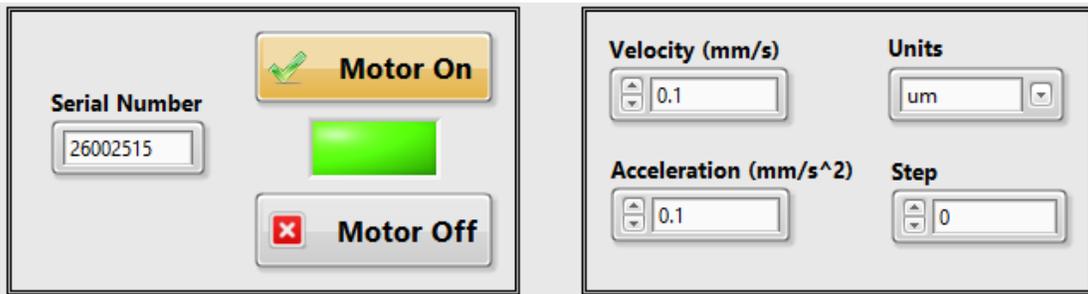


Ilustración 26 Adquisición automática de una serie de interferogramas

Los interferogramas en serie se guardan en dos formatos, *BMP* y *PGM*.

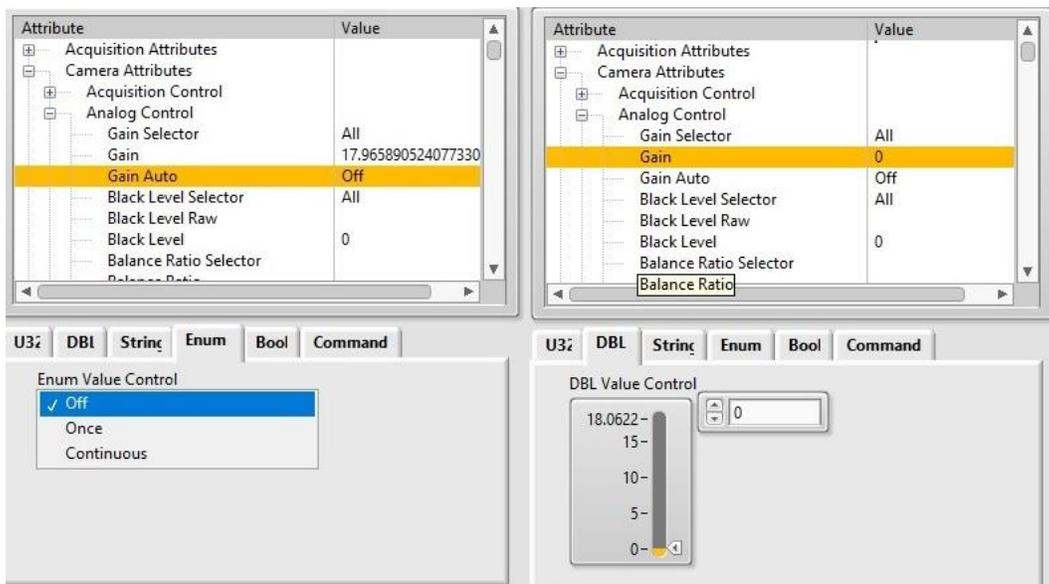
#### 4. Ejemplo para obtener una serie de interferogramas y extraer la fase con MATLAB

- a) La luz del LUFABEO debe permanecer apagada en todo momento, para poder apreciar el patrón de interferencia.
- b) En la ventana del motor únicamente se prenderá el motor y se verifica que las unidades del paso sean micrómetros. La velocidad y aceleración permanecen con los valores que vienen por defecto.

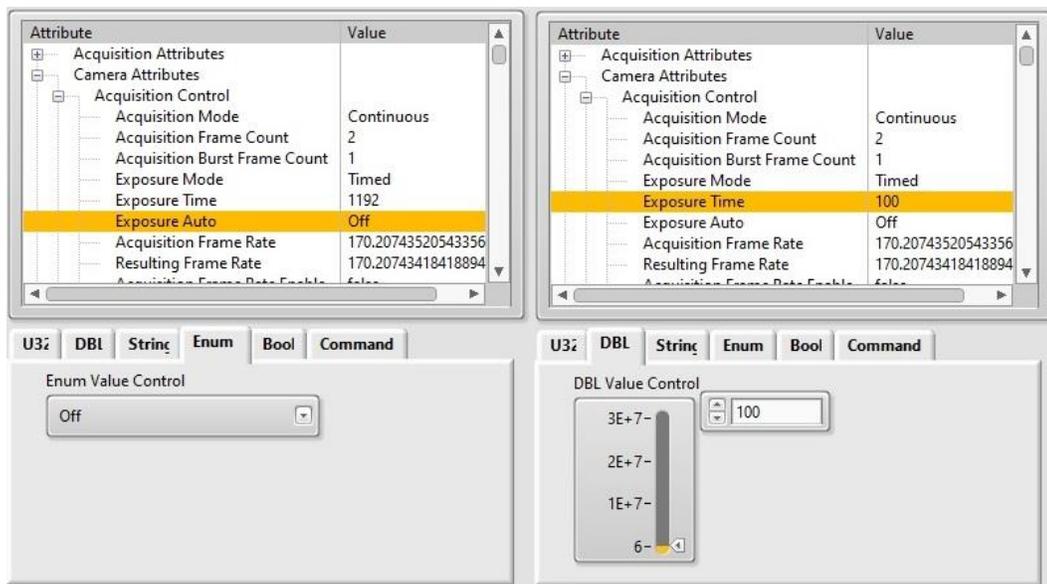


- c) Los parámetros a ajustar en la cámara son la ganancia, el tiempo de exposición y la tasa de muestreo.

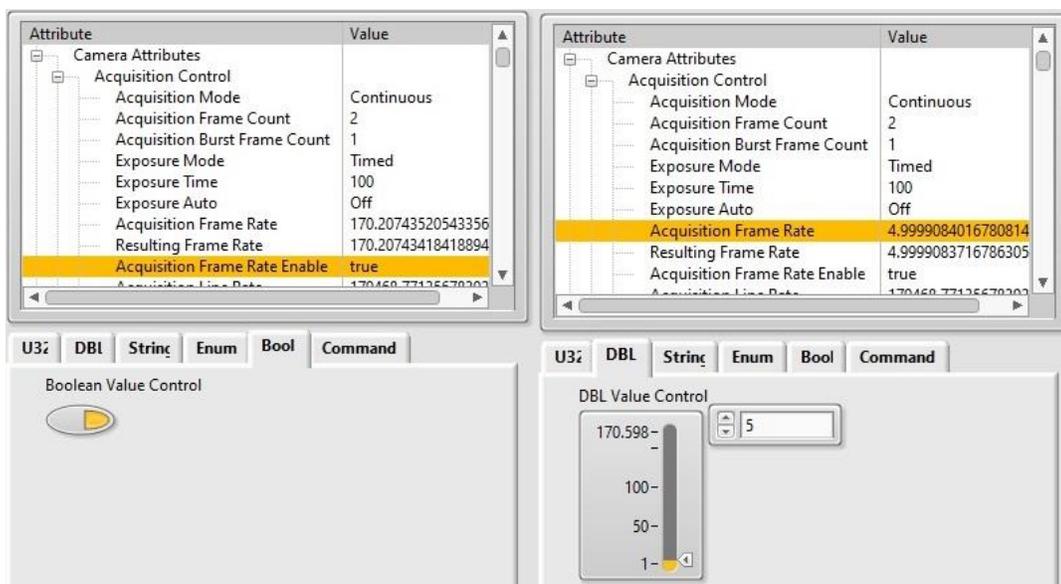
La ganancia no debe ser continua, para poder modificar el valor se tiene que poner en Off. La ganancia debe ser nula.



No hay un valor de tiempo de exposición exacto, dependerá de las condiciones de cada vez que se use el interferómetro, únicamente debe verificarse que el brillo del patrón de interferencia no esté saturando la cámara.

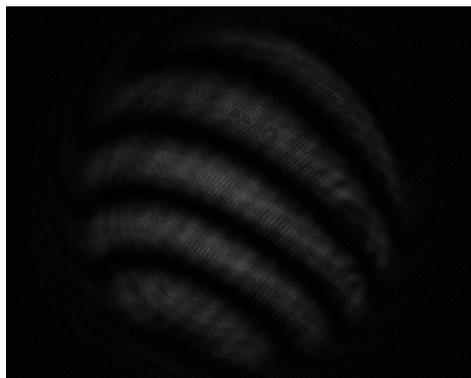


Cuanto mayor es la tasa de muestreo, la calidad del video es mayor, sin embargo, los interferogramas son imágenes sin movimiento, por lo que es conveniente una tasa de muestreo baja, de esta manera hay menos cuadros por segundo y más tiempo para la integración de la imagen.



Conviene conseguir un patrón de interferencia con pocas franjas. Esto se logra moviendo la superficie bajo prueba con los tornillos. El patrón de interferencia debe estar centrado.

Siguiendo los pasos indicados, se obtienen interferogramas como el mostrado en la ilustración siguiente.



- d) Indicar 10 interferogramas con un paso de 10 micrómetros. El tiempo de espera esta por defecto, pero si se desea se puede modificar. Elegir el nombre *prueba* para los interferogramas y guardarlos la dirección *C:\Users\...\Software\_Fizeau\PSI Analysis\Prueba*, de no existir la carpeta *Prueba* se puede crear. Comenzar la adquisición de los datos.

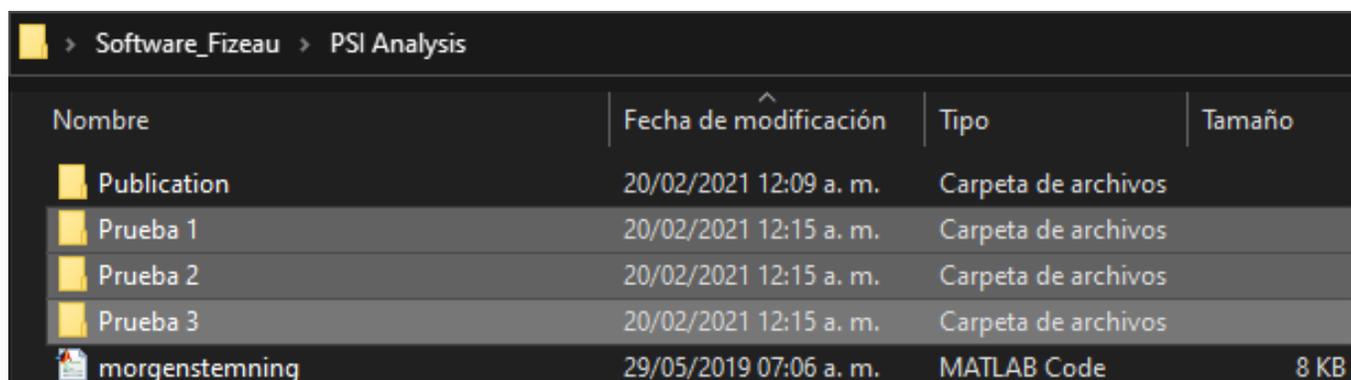
<b>Interferogram Name</b> prueba	<b>Step lenght</b> 10	<b>X resolution</b> 0	<b>Y resolution</b> 0	
<b>Interferogram Path</b> C:\Users\Alejandra	<b>Frames</b> 10	 <b>Measurements</b>		
<b>Milliseconds to wait</b> 1000	<b>Iteration Number</b> 0			
		<b>Moving</b>	<b>Snapshot</b>	<b>Finish</b>
		<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

- e) Dentro del folder *Software\_Fizeau*, se encuentra un folder llamado *PSI Analysis* el cual contiene archivos de MATLAB, para realizar el análisis de los interferogramas, abrir el archivo *psi\_OPD.m* y correr el código.  
Dentro de la misma carpeta *PSI Analysis* se puede consultar el Excel que contiene los coeficientes de los primeros 24 términos de lo polinomios de Zernike, correspondientes a la prueba.

## 5. Interferometría por Desplazamiento de Fase con MATLAB

En el folder *PSI Analysis* se encuentran archivos de Excel donde se pueden observar los datos resultantes del análisis. Dentro de este mismo folder hay una carpeta llamada *Publication* la cual contiene respaldos por día de los análisis que se hacen.

El código *psi\_OPD.m* no solo extrae la fase de un conjunto de interferogramas, sino que también puede comparar datos entre varias series de datos. Lo único que se necesita es guardar los interferogramas en diferentes carpetas. Aun si se tiene una única serie de imágenes, también es necesario guardarlas en una carpeta (sin importar el nombre de esta), pues el algoritmo busca imágenes PGM que estén dentro de una carpeta.



Nombre	Fecha de modificación	Tipo	Tamaño
Publication	20/02/2021 12:09 a. m.	Carpeta de archivos	
Prueba 1	20/02/2021 12:15 a. m.	Carpeta de archivos	
Prueba 2	20/02/2021 12:15 a. m.	Carpeta de archivos	
Prueba 3	20/02/2021 12:15 a. m.	Carpeta de archivos	
morgenstemning	29/05/2019 07:06 a. m.	MATLAB Code	8 KB

Ilustración 27 Ejemplo de cómo guardar varios conjuntos de interferogramas para analizar

En el código *psi\_OPD.m* aparece una sección donde los parámetros experimentales son definidos, si así se requiere, estos parámetros se pueden modificar, según las condiciones de experimento. Por ejemplo, la longitud de onda con la que se está trabajando, la longitud de paso y el número de pasos.

```

8      % Experimental parameter definition
9      wavelength = 632.8e-9; % in meters
10     desired_step_size = 10e-6; % in meters
11     downsampling_factor = 8;
12     matrix_side_size = 1024 / downsampling_factor;
13     number_of_frames = 10;

```

Ilustración 28 Definición de los parámetros experimentales

Por cada conjunto de interferogramas, *psi\_OPD* obtiene 12 mapas de OPD.

1. recovered\_OPD\_sspca\_16x16
2. reconstructed\_OPD\_sspca\_16x16
3. OPD\_wo\_first\_4\_zernike\_terms\_sspca\_16x16
4. recovered\_OPD\_sspca\_8x8
5. reconstructed\_OPD\_sspca\_8x8
6. OPD\_wo\_first\_4\_zernike\_terms\_sspca\_8x8
7. recovered\_OPD\_sspca\_4x4
8. reconstructed\_OPD\_sspca\_4x4
9. OPD\_wo\_first\_4\_zernike\_terms\_sspca\_4x4
10. recovered\_OPD\_greivenkamp
11. reconstructed\_OPD\_greivenkamp
12. OPD\_wo\_first\_4\_zernike\_terms\_greivenkamp

Al momento de imprimir los mapas, estos aparecen en el orden de la lista anterior.

**recovered\_OPD** → Corresponde al mapa con la fase recuperada por el algoritmo.

**reconstructed\_OPD** → Corresponde al mapa reconstruido a partir de los coeficientes de Zernike ajustados.

**OPD\_wo\_first\_4\_zernike\_terms** → Corresponde al mapa reconstruido a partir de los coeficientes de Zernike ajustados, quitando los primeros 4 términos: pistón, inclinación en los ejes vertical y horizontal y defoco.

Los mapas OPD se pueden consultar en la carpeta *Publication* o bien desde la ventana de comandos de MATLAB con los comandos:

```
plot_results(recovered_OPD_sspca_16x16, ...
    reconstructed_OPD_sspca_16x16, ...
    OPD_wo_first_4_zernike_terms_sspca_16x16, ...
    horizontal_vector, vertical_vector, "SSPCA 16x16")
```

```
plot_results(recovered_OPD_sspca_8x8, ...
    reconstructed_OPD_sspca_8x8, ...
    OPD_wo_first_4_zernike_terms_sspca_8x8, ...
    horizontal_vector, vertical_vector, "SSPCA 8x8")
```

```
plot_results(recovered_OPD_sspca_4x4, ...
reconstructed_OPD_sspca_4x4, ...
OPD_wo_first_4_zernike_terms_sspca_4x4, ...
horizontal_vector, vertical_vector, "SSPCA 4x4")
```

```
plot_results(recovered_OPD_greivenkamp, ...
reconstructed_OPD_greivenkamp, ...
OPD_wo_first_4_zernike_terms_greivenkamp, ...
horizontal_vector, vertical_vector, "Least-squares")
```

Un ejemplo de un mapa OPD obtenido, se muestra en la ilustración 29.

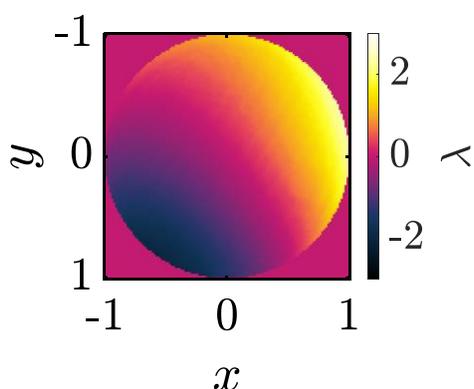


Ilustración 29 Mapa OPD con la fase recuperada por el algoritmo SSPCA 16x16

Dentro de la carpeta *PSI Analysis* se crea un Excel que contiene los coeficientes de los primeros 24 términos de los polinomios de Zernike, correspondientes al último análisis realizado.

En el Excel están los coeficientes de los polinomios de Zernike obtenidos con los métodos de mínimos cuadrados y SSPCA (4x4, 8x8 y 16x16), para cada prueba. Así que, si se tiene más de una prueba, aparecerán 4 columnas de valores para cada una de estas.

ZernikeCoefs	Greivenkamp	SSPCA_16x16	SSPCA_8x8	SSPCA_4x4
0	0.085	0.237	0.237	0.237
1	0.103	0.264	0.321	0.322
2	0.160	0.907	0.914	0.929
3	0.078	0.140	0.140	0.140
4	-0.106	-0.197	-0.197	-0.197
5	0.030	0.088	0.088	0.089
6	0.031	0.012	0.012	0.012

Ilustración 30 Ejemplo de tabla Excel con los coeficientes de los polinomios de Zernike para una sola prueba

En la carpeta *Publication* se pueden consultar tanto los mapas de OPD como la tabla con los coeficientes de Zernike de pruebas anteriores. Se hace un respaldo por día, no por prueba, es decir, si en un mismo día se hacen varias pruebas, aquella que queda registrada será la última prueba realizada ese día. Los datos que se guardan y que posteriormente pueden ser consultados, corresponden al último análisis realizado ese día.

## 6. Solución a posibles problemas

En esta sección se presentarán algunos problemas que pueden ocurrir al usar SCIF y la solución para cada uno de ellos.

- o **SCIF no está realizando alguna acción al apretar los botones.**



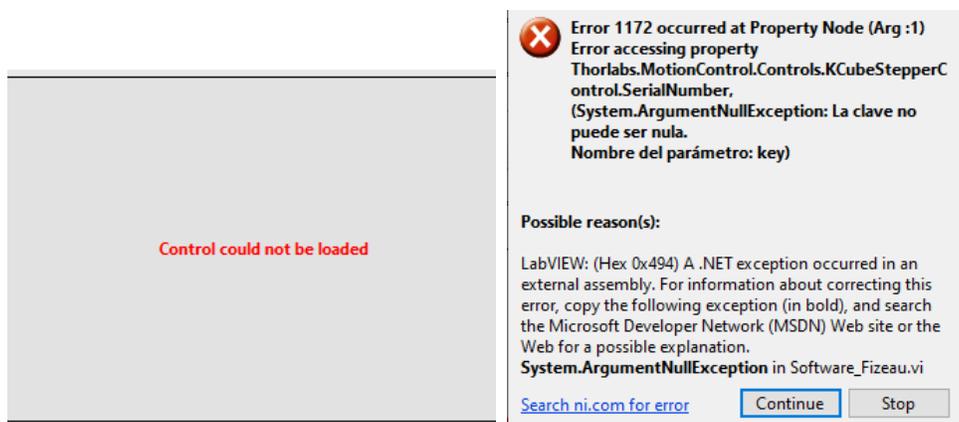
Para utilizar SCIF es necesario correr el sistema apretando la flecha blanca.

- o **No se puede correr SCIF porque la flecha aparece rota.**



Es posible que algún archivo de la carpeta *Software\_Fizeau* la cual contiene a SCIF, se haya cambiado de lugar. Al recuperar el archivo movido o eliminado, la flecha aparecerá en blanco y SCIF ya se puede correr.

- o **En la sección de motor sale la leyenda *Control could not be loaded* y además al apretar el botón *Motor on* aparece el siguiente error.**



Este error aparece porque SCIF no se abrió desde el proyecto, para solucionarlo se deberán seguir los pasos 1 – 3 mencionados en la sección 2.3 *Instalación y configuración de SCIF*.

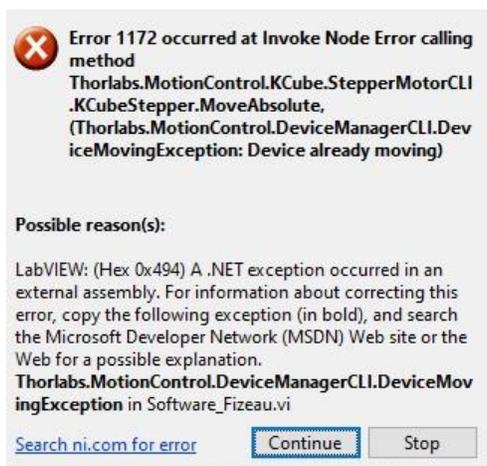
- **Al intentar usar el motor aparece la leyenda *No Suitable Devices Found*.**

No Suitable Devices Found

Aceptar

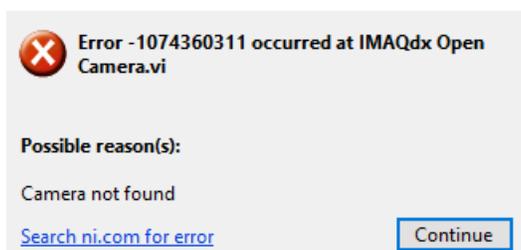
Verificar que el motor se encuentre enchufado a la toma de corriente, prendido y además conectado a la computadora.

- **Error tiempo del motor**

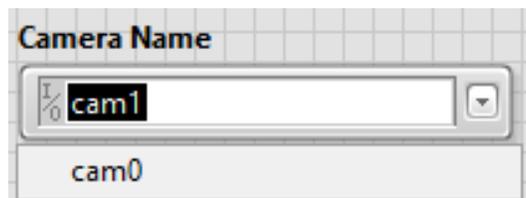


Este error surge cuando se quiere hacer una secuencia de movimientos con el motor (ilustración 20) y el tiempo de espera es muy pequeño. Para dar solución al problema, se debe poner un tiempo mayor al establecido.

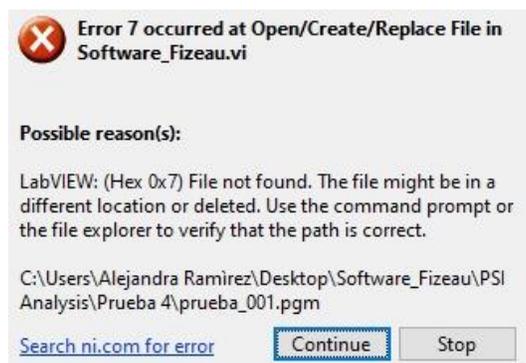
- **Cámara no encontrada**



Verificar que la cámara seleccionada sea la CMOS. Se puede ver desde *NI MAX* (se instala automáticamente con *LabVIEW*) que la cámara está siendo controlada por *LabVIEW* por cómo se observa en la ilustración 11. O bien, dirigirse a la carpeta *Software\_Fizeau\Grab and Attributes Setup Folder*, abrir el archivo *Grab and Attributes Setup.vi*, seleccionar la cámara CMOS (*cam1* generalmente) y guardar.



### o Carpeta no encontrada



Cuando se guarda un interferograma o una serie de interferogramas y la carpeta que indicamos no se encuentra o es incorrecta sale un error. Este puede ser un problema muy común porque para seleccionar una carpeta, *LabVIEW* requiere que haya un archivo dentro de esa carpeta para seleccionarlo y así obtener la dirección. La solución más rápida y conveniente es indicar la dirección manual, es decir, escribir en *Interferogram Path* la ubicación donde se desean guardar los interferogramas.

### o Error en MATLAB

Si al momento de hacer el análisis de los interferogramas en *MATLAB*, sale el siguiente error.

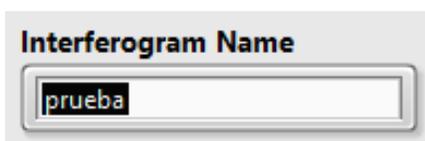
```
Error using imread>get_full_filename (line 570)
File "C:\Users\Alejandra Ramirez\Desktop\Software_Fizeau\PSI Analysis\Prueba\pruea_001.bmp" does not exist.

Error in imread (line 377)
    fullname = get_full_filename(filename);

Error in psi_OPD (line 108)
    imread(fullfile(subFolders(test_number).folder,subFolders(test_number).name, ...
```

Dirigirse a la línea 109 del código y verificar que el nombre del archivo corresponda al nombre propuesto para los interferogramas. Se puede modificar la parte sombreada en el código o el nombre en SCIF, a manera de que ambos coincidan.

```
107 -         interferogram_frames(:, :, interferogram_frame_number) = ...
108             imread(fullfile(subFolders(test_number).folder,subFolders(test_number).name, ...
109                 sprintf('prueba_%03d.bmp', interferogram_frame_number)));
110 -     end
```



## 7. Preguntas frecuentes y datos de contacto

**No se ve el patrón de interferencia en la cámara.**

Primero asegúrate que la tapa de la cámara no esté puesta.

Si aun así el patrón de interferencia no se ve, es posible que la superficie bajo prueba haya sido movida. Puedes mover la pieza de prueba desde los tornillos de su montura hasta conseguir un patrón de o interferencia centrado y con pocas franjas.

**¿Dónde encuentro los interferogramas si no sé dónde se guardaron?**

Puedes buscarlos en los archivos de la computadora con el nombre que hayas indicado previamente o puedes ir a la sección de *Interferograms* de SCIF y ver la dirección en *Interferogram Path*.

**¿Cómo abrir un archivo *BMP*?**

Los interferogramas son guardados en formato *BMP*, el cual es una forma de codificar imágenes sin comprimir los datos. Una manera de abrir archivo *BMP* es utilizar un visor

de archivos universal. Sin problema, estos archivos pueden abrirse usando el visualizador de imágenes de su preferencia.

### ¿Cómo abrir un archivo *PGM*?

Los interferogramas también son guardados en formato *PGM*, los cuales son archivos de texto portables que contienen datos de la imagen en escala de grises. El encabezado de estos archivos contiene diversos datos, por ejemplo, el ancho y alto de la imagen. Una manera sencilla de abrir estos archivos es con MATLAB usando *imread*, rotando 90° y poniéndola en espejo, de la siguiente manera.

```
imagen = imread('archivo.pgm'); % leer archivo PGM
```

```
imagen = rot90(imagen); % rotar 90 grados
```

```
imagen = flipud(imagen); % espejo
```

### ¿Cómo guardo los interferogramas en otro formato?

No es posible elegir el formato en que se guardan los interferogramas, ya que *BMP* y *PGM* son las extensiones de archivo que son de interés. Si se desea guardar en otro formato, se tendría que programar la sección de guardado en LabVIEW desde el editor donde aparecen los diagramas de bloques.

### ¿Cómo salir del SCIF?

El botón para salir definitivamente del SCIF es *EXIT* el cual se encuentra en la ventana *Interferograms*.

### ¿Dónde encuentro el número de serie del motor?

El número de serie del motor son 8 dígitos que se encuentran en la parte trasera del motor.

### ¿Cómo detener una secuencia de adquisición de interferogramas?

No es posible pausar ni parar una secuencia, se deberá esperar a que la adquisición de interferogramas finalice, para poder hacer cambios en los parámetros.

## Datos de contacto

Alejandra Ramírez

55 60 39 74 63

[alexjzkax@gmail.com](mailto:alexjzkax@gmail.com)

## Trabajo a futuro

En este manual se presentó la primera versión de SCIF, se espera que, para versiones futuras, el análisis de los interferogramas se haga de manera automática, integrando MATLAB a LabVIEW. También se puede hacer un archivo ejecutable *.exe* de SCIF, quedando como quedando como una aplicación. Además, se pueden integrar más funciones del motor.

## 8. Referencias

- [1] J. E. Greivenkamp. *Generalized data reduction for heterodyne interferometry*. Optical Engineering, 23(4):350-352, 1984.
- [2] S. Yang, W. Zhao, L. Qiu, Y. Wang, and S. Tian. *Fast and accurate tilt-shift-immune phaseshifting algorithm based on self-adaptive selection of interferogram subblocks and principal component analysisdecomposition principle for linear programs*. Applied Optics, 59(9), 2020.

# Certificados

A continuación, se presentan los certificados de diferentes actividades donde se participó, en el periodo de duración de los estudios de maestría.



**OSA** Universidad Nacional  
Autónoma de México  
Student Chapter

**CEOF**  
COMUNIDAD ESTUDIANTIL DE ÓPTICA Y FOTÓNICA



Certificate of Participation as part of the IONS OPUMA 2020 Organizing Committee  
June 8th - 12th, 2020

**Alejandra Ramírez**

for her work as Zoom Moderator

**Jonathan A. Urrutia Anguiano**  
Academic Committee Chair

**Guillermo A. Pérez Lobato**  
Collaboration Chair

**Daniela K. Calvo Ramos**  
Local Committee Chair

**Dr. Karen Volke-Sepúlveda**  
OSA - UNAM Student  
Chapter Advisor



2do. Congreso de Tópicos Avanzados  
de Óptica y Electrónica



## CERTIFICADO DE ASISTENCIA

Otorgamos este certificado a

# ROSA ALEJANDRA RAMÍREZ RAMÍREZ

por asistir al 2do. Congreso de Tópicos Avanzados de Óptica y Electrónica, llevado a cabo del 25 al 27 de noviembre del 2020 en la ciudad de San Pedro Cholula, Puebla.

Dr. Fermín Granados Salomón  
Coordinador Departamento de Óptica INAOE

M.C. Ivonne Cázares Aguilar  
Presidenta OSA capítulo INAOE

Lic. Ana Elizabeth Espinoza Momo  
Presidenta SPIE capítulo INAOE

M.C. Hans Israel Morales López  
Presidente IEEE capítulo INAOE



Gobierno de Puebla  
Hacia el futuro



ESTADO DE PUEBLA



SPIE STUDENT CHAPTER



OSA

INAOE





2do. Congreso de Tópicos Avanzados  
de Óptica y Electrónica



El comité organizador del 2do. Congreso de Tópicos Avanzados de Óptica y Electrónica junto con la coordinación de Óptica del INAOE, otorga la presente constancia a:

## ROSA ALEJANDRA RAMÍREZ RAMÍREZ

por su participación con el trabajo "Construcción de un interferómetro de Fizeau y el diseño de control para la toma interferogramas" en modalidad de póster el día 26 de noviembre del 2020.

Dr. Fermín Granados Salomon  
Coordinador Departamento de Óptica INAOE

M.C. Ixse Ivonne Cazares Aguilar  
Presidenta OSA capítulo INAOE

Lic. Ana Elizabeth Espinoza Momoa  
Presidenta SPIE capítulo INAOE

M.C. Hans Israel Morales López  
Presidente IEEE capítulo INAOE



Gobierno de Puebla



INAOE



SPIE. STUDENT CHAPTER



OSA

IEEE





# Student Chapter

---

# OSA - UNAM



Constancia de participación de:

**Rosa Alejandra Ramírez Ramírez**

En el curso de:

**Python y cómo aplicarlo a la óptica**

Impartido por M. en I. José Agustín Moreno

Que se llevó a cabo los días 8,10,15 y 17 de Febrero del 2021

A handwritten signature in blue ink, reading "José Agustín Moreno", is written over a horizontal line.

M. en I. José Agustín Moreno  
Instructor del curso

A handwritten signature in blue ink, reading "Georgina M. Molina", is written over a horizontal line.

M. en C. Georgina M. Molina  
Presidenta del capítulo

A handwritten signature in blue ink, reading "Karen Volke", is written over a horizontal line.

Dra. Karen Volke  
Asesora del capítulo