



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA ELÉCTRICA– INSTRUMENTACIÓN

SISTEMA DE MEDICIÓN INTERFEROMÉTRICO DE COMPONENTES
OPTOMECÁNICOS Y SU APLICACIÓN EN AMBIENTES CRIOGÉNICOS.

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:

TAQUE VÁZQUEZ JULIO ALBERTO

TUTORES

DR. FARAH SIMÓN ALEJANDRO, INSTITUTO DE ASTRONOMÍA UNAM

DR. ÁLVAREZ NÚÑEZ LUIS CARLOS, INSTITUTO DE ASTRONOMÍA UNAM

MÉXICO, D. F. ENERO 2014.

Jurado Asignado:

Presidente:	Dr. Medina Tanco Gustavo Adolfo
Secretario:	Dr. Sandoval Romero Gabriel Eduardo
Vocal:	Dr. Farah Simón Alejandro
1^{er} Suplente:	Dr. Kussul Ernst Mikhailovich
2^{do} Suplente:	Dr. Álvarez Núñez Luis Carlos

Lugar donde se realizó la tesis: Instituto de Astronomía



Tutores de Tesis

Dr. Farah Simón Alejandro

Dr. Álvarez Núñez Luis Carlos

FIRMA

FIRMA

Agradecimientos

Al Dr. Luis Carlos Álvarez Núñez, por la confianza, la paciencia, la comprensión, pero sobre todo por los conocimientos y enseñanzas transmitidos. Gracias por guiarme en este intrincado camino y por brindarme tu amistad durante todo este tiempo, tu ayuda y apoyo han sido imprescindibles para la realización de este trabajo.

Al Dr. Alejandro Farah Simón, por tus buenos consejos, el constante aporte de ideas y por todo lo que me permitiste aprender.

A los miembros del jurado, por las observaciones hechas durante el desarrollo y conclusión de este trabajo.

Al CONACyT por la beca otorgada durante mis estudios de maestría.

Dedicatorias

A mis padres, por su confianza incondicional y aliento para emprender esta etapa que hoy se ve culminada, porque esto no sería posible sin ustedes.

A mis hermanos, por ser mi mas grande apoyo en esta vida, gracias por brindarme su cariño y por los increíbles momentos compartidos.

Índice general

RESUMEN	1
I.- INTRODUCCIÓN.	3
1.1. ESPECTROSCOPÍA INFRARROJA	3
1.2. FRIDA	4
1.2.1 <i>Óptica para el modo de imagen de FRIDA.....</i>	<i>7</i>
<i>Filtros de banda ancha.....</i>	<i>8</i>
<i>Filtros de banda angosta.....</i>	<i>8</i>
1.2.2 <i>Óptica para el modo de espectroscopía de campo integral de FRIDA.....</i>	<i>9</i>
1.2. JUSTIFICACIÓN	10
1.3. OBJETIVO	11
1.4. ALCANCES Y LIMITACIONES.....	12
II.- MARCO TEÓRICO	13
2.1. FUNCIONAMIENTO DE UN LÁSER.....	13
2.2. FENÓMENOS DE LA LUZ.....	14
2.2. CONCEPTO DE SPECKLE.....	16
2.3. FORMACIÓN DE SPECKLE	18
2.3.1. <i>Speckle Objetivo.</i>	<i>19</i>
2.3.2. <i>Speckle Subjetivo.</i>	<i>19</i>
2.4. FENÓMENO DE INTERFERENCIA.	21
2.5. ECUACIÓN DE UNA LENTE DELGADA.....	24
2.6. APERTURA NUMÉRICA.....	25
III.- MEDICIÓN DE DESPLAZAMIENTOS Y DEFORMACIONES.....	26
3.1. FUERA DE PLANO.	27
3.2. EN PLANO.....	29
3.3. RELACIÓN ENTRE DESPLAZAMIENTO Y FASE.....	31
IV.- ANÁLISIS DE DEFORMACIONES EN SISTEMAS OPTOMECÁNICOS MEDIANTE ESPI.....	35
4.1. ANÁLISIS DE TOLERANCIAS.	35
4.2. DISPOSITIVO EXPERIMENTAL (FUERA DE PLANO).	38
4.2.1. <i>Montaje.....</i>	<i>40</i>
4.2.2. <i>Puesta a punto de la técnica.....</i>	<i>41</i>
4.2.3. <i>Tamaño del speckle.....</i>	<i>42</i>
4.2.4. <i>Resultados Experimentales.....</i>	<i>43</i>
4.3. DISPOSITIVO EXPERIMENTAL (EN PLANO).....	44
4.3.1. <i>Montaje.....</i>	<i>45</i>
4.3.2. <i>Puesta a punto de la técnica.....</i>	<i>47</i>
4.3.3. <i>Tamaño del speckle.....</i>	<i>50</i>
4.3.4. <i>Resultados Experimentales.....</i>	<i>51</i>
4.3.5. <i>Análisis de medidas de dispersión estadística.....</i>	<i>55</i>
V.- ESTUDIO CUANTITATIVO DE LAS FUERZAS QUE ACTÚAN EN LOS SISTEMAS OPTOMECÁNICOS.....	56
5.1. ANÁLISIS DE DEFORMACIONES EN PLACAS METÁLICAS.....	57
5.2. RESULTADOS.....	58

VI.- ANÁLISIS MEDIANTE ELEMENTO FINITO DE LAS DEFORMACIONES EN SISTEMAS OPTOMECAÓNICOS.....	65
6.1. MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS.	65
6.2. ANÁLISIS POR ELEMENTOS FINITOS.....	67
6.3. RESULTADOS.....	73
VII. COMPARACIÓN DE RESULTADOS.....	76
7.1. RESULTADOS EXPERIMENTALES VS SIMULACIONES.....	76
VIII.- CONCLUSIONES.	83
8.1. TRABAJO A FUTURO.....	84
8.2. APLICACIONES FUTURAS.....	85
REFERENCIAS	86
APÉNDICE	91
A- CÓDIGO FUENTE	91
B- VIDEOCÁMARA WATEC.....	94
C- MACRO Y ZOOM.....	95
D- CÁMARA DIMAGE A2	97
E- CONSTANCIA CIICA 2013	99

Índice de figuras

FIGURA 1: GRAN TELESCOPIO DE CANARIAS	4
FIGURA 2: INSTRUMENTO OSIRIS	5
FIGURA 3: INSTRUMENTO FRIDA.....	6
FIGURA 4: MODO IMAGEN DEL INSTRUMENTO FRIDA.....	7
FIGURA 5: MODO ESPECTROSCOPÍA DEL INSTRUMENTO FRIDA	9
FIGURA 6: SISTEMA OPTOMECAÁNICO DEL COLIMADOR DE FRIDA (NOTE LOS FLEJES DE SUJECIÓN DEL BARRIL QUE SOPORTAN LAS LENTES).....	11
FIGURA 7: ESQUEMA BÁSICO DEL FUNCIONAMIENTO DE UN LÁSER.	14
FIGURA 8: REFLEXIÓN ESPECULAR.....	15
FIGURA 9: REFLEXIÓN DIFUSA.	15
FIGURA 10: REFLEXIÓN Y REFRACCIÓN DE LA LUZ EN UNA INTERFAZ.....	15
FIGURA 11: ALTERACIÓN EN LA DIRECCIÓN DE UN FOTÓN AL SER DISPERSADO.....	16
FIGURA 12 : FORMACIÓN DE UN PATRÓN DE SPECKLE.....	16
FIGURA 13: FOTOGRAFÍA DE UN FRAGMENTO DE TEXTO TOMADA BAJO ILUMINACIÓN COHERENTE (LÁSER).....	17
FIGURA 14: FOTOGRAFÍA DE UN FRAGMENTO DE TEXTO TOMADA BAJO LUZ NATURAL.....	17
FIGURA 15: FORMACIÓN DE SPECKLE.	18
FIGURA 16: FORMACIÓN DE SPECKLE OBJETIVO.	19
FIGURA 17: FORMACIÓN DE SPECKLE SUBJETIVO.	20
FIGURA 18: SISTEMA ÓPTICO Y DIAFRAGMA CIRCULAR (SPECKLE SUBJETIVO).....	20
FIGURA 19: FRANJAS DE INTERFERENCIA PROVENIENTES DE LA REFLEXIÓN DE UN HÁZ LÁSER EN DOS SUPERFICIES METÁLICAS	22
FIGURA 20: PATRÓN DE FRANJAS SOBRE UN PLANO DE REFERENCIA.....	22
FIGURA 21: PATRÓN DE FRANJAS DE INTERFERENCIA MEDIANTE LA SUSTRACCIÓN DE IMÁGENES.	24
FIGURA 22: ESQUEMA DE LA FORMACIÓN DE IMAGEN A TRAVÉS DE UNALENTE CONVERGENTE.....	25
FIGURA 23: MEDICIÓN DE DESPLAZAMIENTOS (CONFIGURACIÓN FUERA DE PLANO).....	27
FIGURA 24: PROYECCIÓN DE LAS COMPONENTE DE DESPLAZAMIENTO EN Z.....	28
FIGURA 25: COMPONENTE DE DESPLAZAMIENTO EN Z.	28
FIGURA 26: MEDICIÓN DE DEFORMACIONES (CONFIGURACIÓN EN PLANO).	29
FIGURA 27: PROYECCIÓN DE LAS COMPONENTE DE DESPLAZAMIENTO EN X,Y.	30
FIGURA 28: COMPONENTE DE DESPLAZAMIENTO EN X,Y.....	30
FIGURA 29: ARREGLO FUERA DE PLANO (RELACIÓN ENTRE FASE Y DESPLAZAMIENTO).....	31
FIGURA 30: ARREGLO EN PLANO (RELACIÓN ENTRE FASE Y DESPLAZAMIENTO).	33
FIGURA 31: MICRÓMETRO MITUTOYO MODELO ID-C112EBS	36
FIGURA 32: GONIÓMETRO SALOOJA BROTHERS PVT. LTD.	36
FIGURA 33: LÁSER HE-MELLES GRIOT MODELO 05-LHP-691.....	36
FIGURA 34: PLATINA DE TRASLACIÓN CON MICRÓMETRO THORLABS MODELO 7T167	37
FIGURA 35: ESPEJO DE PRIMERA REFLEXIÓN.	37
FIGURA 36: PULIDO DE PLACAS CON ABRASIVO DE 220 μm	38
FIGURA 37: FUNCIONAMIENTO DE UN PINHOLE	39
FIGURA 38: FILTRO PASO BAJAS (PINHOLE) PARA ELIMINAR EL RUIDO INTRODUCIDO EN UN HAZ POR LA DISPERSIÓN DE PARTÍCULAS.	39
FIGURA 39: MONTAJE ESQUEMÁTICO DE LA CONFIGURACIÓN FUERA DE PLANO REALIZADA.	40
FIGURA 40: MONTAJE REAL DE LA CONFIGURACIÓN FUERA DE PLANO REALIZADA.	40
FIGURA 41: PARÁMETROS DE LA CÁMARA DIGITAL PREVIOS A LA TOMA DE IMÁGENES.	41
FIGURA 42: VELOCIDAD DE OBTURACIÓN, NÚMERO F.....	41
FIGURA 43: FRANJAS DE INTERFERENCIA EN CONFIGURACIÓN FUERA DE PLANO CON PLACAS METÁLICAS.....	43
FIGURA 44: CAPTURADORA DE VIDEO PARA LA ADQUISICIÓN DE IMÁGENES.	44
FIGURA 45: MACRO Y ZOOM UTILIZADOS PARA LA CONFIGURACIÓN EN PLANO	45
FIGURA 46: MONTAJE ESQUEMÁTICO PARA LA CONFIGURACIÓN EN PLANO REALIZADA.....	46
FIGURA 47: MONTAJE REAL DE LA CONFIGURACIÓN EN PLANO REALIZADO.....	46
FIGURA 48: REPRESENTACIÓN DE UNA IMAGEN A ESCALA DE GRISES EN MATLAB.....	47

FIGURA 49: REPRESENTACIÓN DE UNA IMAGEN RGB EN MATLAB	47
FIGURA 50: GRAFICA DE LA ECUACIÓN DEL SISTEMA PARA LA CONFIGURACIÓN EN PLANO.....	53
FIGURA 51: REPRESENTACIÓN GRAFICA DEL NÚMERO F.	53
FIGURA 52: MEDICIÓN DE DESPLAZAMIENTOS EN PLACAS METÁLICAS SOBRE EL EJE X.	57
FIGURA 53: MEDICIÓN DE DESPLAZAMIENTOS EN PLACAS METÁLICAS SOBRE EL EJE Y.	57
FIGURA 54: NOMENCLATURA PARA EL MONTAJE EXPERIMENTAL EN PLANO REALIZADO.	58
FIGURA 55: FRANJAS DE INTERFERENCIA OBTENIDAS EN LA ESQUINA SUPERIOR IZQUIERDA PARA EL EJE X.	60
FIGURA 56: FRANJAS DE INTERFERENCIA OBTENIDAS EN LA ESQUINA SUPERIOR DERECHA PARA EL EJE X.	60
FIGURA 57: FRANJAS DE INTERFERENCIA OBTENIDAS EN LA ESQUINA INFERIOR IZQUIERDA PARA EL EJE X.....	61
FIGURA 58: FRANJAS DE INTERFERENCIA OBTENIDAS EN LA ESQUINA INFERIOR DERECHA PARA EL EJE X.....	61
FIGURA 59: FRANJAS DE INTERFERENCIA OBTENIDAS EN LA ESQUINA SUPERIOR IZQUIERDA PARA EL EJE Y.	63
FIGURA 60: FRANJAS DE INTERFERENCIA OBTENIDAS EN LA ESQUINA SUPERIOR DERECHA PARA EL EJE Y.	63
FIGURA 61: FRANJAS DE INTERFERENCIA OBTENIDAS EN LA ESQUINA INFERIOR IZQUIERDA PARA EL EJE Y.....	64
FIGURA 62: FRANJAS DE INTERFERENCIA OBTENIDAS EN LA ESQUINA INFERIOR DERECHA PARA EL EJE Y.....	64
FIGURA 63: MODELO EN 3D PARA EL ANÁLISIS DE FUERZAS MEDIANTE SOLIDWORKS®	67
FIGURA 64: PROPIEDADES Y MATERIAL UTILIZADO PARA EL ANÁLISIS POR ELEMENTO FINITO.	68
FIGURA 65: CONDICIONES DE CONTORNO.....	69
FIGURA 66: APLICACIÓN DE LAS FUERZAS MEDIANTE SOLIDWORKS.....	70
FIGURA 67: PARÁMETROS DE MALLADO. PARA LA GEOMETRÍA EN FEA.....	70
FIGURA 68: GEOMETRÍA BAJO ESTUDIO MALLADA EN 3 MM.	71
FIGURA 69: DEFORMACIÓN RESULTANTE EN LOS 3 EJES COORDENADOS (x,y,z).	72
FIGURA 70: ANÁLISIS DE DEFORMACIONES MEDIANTE FEA EN SOLIDWORKS PARA EL EJE X.	73
FIGURA 71: ANÁLISIS DE DEFORMACIONES MEDIANTE FEA EN SOLIDWORKS PARA EL EJE Y.	74
FIGURA 72: GRAFICA COMPARATIVA DE DESPLAZAMIENTOS PARA EL EJE X	79
FIGURA 73: % ERROR (EXPERIMENTAL VS SIMULACIÓN) PARA EL EJE X.	80
FIGURA 74: GRAFICA COMPARATIVA DE DESPLAZAMIENTOS PARA EL EJE Y.	81
FIGURA 75: % ERROR (EXPERIMENTAL VS SIMULACIÓN) PARA EL EJE Y	82

Índice de tablas

TABLA 1: CARACTERÍSTICAS DE LA CÁMARA UTILIZADA PARA LA CONFIGURACIÓN FUERA DE PLANO.....	38
TABLA 2: RESULTADOS TEÓRICOS EN CONFIGURACIÓN FUERA DE PLANO.	44
TABLA 3: CARACTERÍSTICAS DE LA CÁMARA UTILIZADA EN CONFIGURACIÓN EN PLANO.	44
TABLA 4: CARACTERÍSTICAS DEL MACRO-ZOOM UTILIZADO EN CONFIGURACIÓN EN PLANO.....	45
TABLA 5: RESULTADOS TEÓRICOS EN CONFIGURACIÓN EN PLANO (PARA EL EJE X).....	51
TABLA 6: RESULTADOS EXPERIMENTALES EN CONFIGURACIÓN EN PLANO (PARA EL EJE X).	52
TABLA 7: PROMEDIO Y DESVIACIÓN ESTÁNDAR DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES EN CONFIGURACIÓN EN PLANO (PARA EL EJE X).	52
TABLA 8: RESULTADOS EXPERIMENTALES DE DEFORMACIONES EN PLACAS METÁLICAS PARA EL EJE X.	59
TABLA 9: TABLA DE EQUIVALENCIAS ENTRE FRANJAS Y DESPLAZAMIENTOS PARA EL EJE X.	59
TABLA 10: RESULTADOS EXPERIMENTALES DE DEFORMACIONES EN PLACAS METÁLICAS PARA EL EJE Y.	62
TABLA 11: TABLA DE EQUIVALENCIAS ENTRE FRANJAS Y DESPLAZAMIENTOS PARA EL EJE Y.	62
TABLA 12: TABLA DE DESPLAZAMIENTOS SIMULADOS Y EXPERIMENTALES (EJE X).....	77
TABLA 13: TABLA DE ERRORES DE DESPLAZAMIENTOS CON RESPECTO AL EJE X.	77
TABLA 14: TABLA DE DESPLAZAMIENTOS SIMULADOS Y EXPERIMENTALES (EJE Y).	78
TABLA 15: TABLA DE ERRORES DE DESPLAZAMIENTOS CON RESPECTO AL EJE Y.	78

Resumen

Cuando se piensa en instrumentación óptica se vuelve necesario pensar también en interferometría. La interferometría es una técnica que aprovecha las propiedades ondulatorias de la luz para desarrollar dispositivos de medición de gran sensibilidad y resolución que pueden llegar al orden de los nanómetros. Es precisamente la utilidad anterior por la que hoy en día se encuentran interferómetros en prácticamente cualquier rama de la industria y la investigación.

En un interferómetro, usualmente un haz de luz coherente es separado en dos rayos de luz por un divisor de haz. Cada haz sigue un camino diferente al del otro y ambos son recombinados antes de ser detectados. La diferencia en la distancia recorrida por cada haz produce una diferencia de fase entre ellos, lo que provoca que aparezcan las llamadas franjas de interferencia.

En éste trabajo desarrollado en el Instituto de Astronomía (IA-UNAM) se presenta una aplicación de medición directa y superficial a través del desarrollo de ESPI: interferometría electrónica de patrones de motas (por sus siglas en inglés) con soluciones tecnológicas simples y en esencia de bajo costo, para su aplicación en la determinación de deformaciones en sistemas optomecánicos y sin la necesidad de alterar su estructura.

Éste método óptico utiliza las propiedades de la luz dispersada por una superficie rugosa cuando es iluminada por un láser. Ésta dispersión produce un moteado luminoso (speckle) que permite extraer características de la estructura bajo estudio tanto en microscopía como en macroscopía, dependiendo si el estudio se realiza en campo completo o en un sitio específico.

El análisis de las propiedades espectrales de la luz láser dispersada genera ciertos patrones relacionados con la estructura anatómica, composición, procesado y textura superficial del objeto bajo estudio que ponen en manifiesto características del material o de la calidad de los procesos a los que ha sido sometido. El uso de ésta técnica implica también la posibilidad de realizar monitorizaciones de procesos en tiempo real y a distancia sin interferir con otros sensores.

Existen multitud de técnicas de análisis de materiales basadas casi en cualquier fenómeno físico imaginable. El número de sensores destinados a implementar tales métodos y su sofisticación crece continuamente, es por eso que solo clasificamos las técnicas no invasivas en los siguientes grupos:

Vibraciones: Vibración transversal, vibración longitudinal, pruebas modales.

Ultrasonidos: Tomografía de ultrasonidos.

Métodos electromagnéticos: Microondas, IR, IR cercano, Rayos X.

Métodos nucleares: Rayos gamma, resonancia magnética nuclear, neutrones.

Podemos observar que hay técnicas de alta y de baja energía. Éste trabajo se va centrar solo en técnicas ópticas¹ y de baja energía por lo que descartaremos todas aquellas basadas en microondas, IR y rayos X. En cuanto a los métodos nucleares, ni siquiera los estudiaremos debido a su alto costo y las medidas de seguridad adicionales que requieren.

En el caso de las técnicas de vibración y ultrasónicas nos restringiremos a su uso debido principalmente a que requieren un contacto físico entre la muestra y el sistema de medición.

La técnica de medición utilizada en esta tesis presenta parámetros de sensibilidad y resolución adecuados para caracterizar desplazamientos y/o deformaciones con valores menores a 1 μ m. Se calculan valores de desplazamiento debido a fuerzas externas inducidas en una placa metálica en cada uno de los ejes coordenados(x,y,z). Posteriormente se realiza la comprobación mediante el Análisis por Elemento Finito.

El presente escrito consta de 8 capítulos:

- El capítulo 1 hace alusión a la justificación, objetivos, alcances y limitaciones del proyecto, el cual viene dado por el instrumento astronómico FRIDA.
- En el capítulo 2 se abordan los fundamentos teóricos para el desarrollo de la técnica, características y parámetros generales para su correcto funcionamiento.
- En el capítulo 3 se profundizan los diferentes arreglos experimentales para medir desplazamientos y/o deformaciones según sea el caso y su respectiva relación de fase.
- En el capítulo 4 y 5 se describe la metodología y puesta a punto de la técnica, además se presentan las pruebas realizadas al sistema implementado y se realiza un análisis de resultados experimentales de las fuerzas que actúan en los sistemas optomecánicos.
- En los capítulos 6 y 7 se presenta una simulación mediante elementos finitos y se realiza una comparación entre resultados experimentales y simulaciones.
- En el capítulo 8 reúne las conclusiones del trabajo y algunas aplicaciones futuras.

¹ Son aquellos métodos que usan la radiación visible del espectro electromagnético para su funcionamiento.

CAPÍTULO

I.- Introducción.

En este capítulo se dará un panorama general acerca del estudio a través de espectroscopía infrarroja, la cual dio pauta para la construcción del instrumento astronómico FRIDA y motivó el desarrollo de esta tesis, así mismo se dará a conocer la justificación, objetivos, alcances y limitaciones.

1.1. Espectroscopía Infrarroja

Es en la parte infrarroja del espectro es donde se encuentran las líneas de emisión y de absorción de la mayoría de las moléculas, así como de numerosos átomos e iones. La espectroscopía infrarroja es la técnica más empleada en la detección de estos elementos en el espacio [1].

Debido a que el infrarrojo puede penetrar regiones muy oscurecidas por el polvo, como ocurre en las regiones de formación estelar y en el centro galáctico, la espectroscopía infrarroja proporciona mucha información sobre objetos que normalmente no pueden ser vistos con luz visible [2].

Como resultado de la Gran Explosión, el Universo se está expandiendo. Esto hace que las líneas espectrales de objetos muy distantes, que normalmente aparecen en la parte ultravioleta o visible del espectro, sufran un corrimiento hacia la parte infrarroja del espectro. Es por ello que la espectroscopía infrarroja es una herramienta valiosa para el estudio del Universo.

Cualquier objeto con una temperatura distinta del cero absoluto (-273 grados Celsius) irradia luz infrarroja. Incluso los objetos que son demasiado fríos para ser detectados ópticamente, pueden ser estudiados en el infrarrojo.

Los estudios espectroscópicos infrarrojos están proporcionando gran información sobre el papel que tienen las moléculas interestelares en la formación de estrellas, planetas y posiblemente en la creación de vida. Por ejemplo, la espectroscopía infrarroja ha mostrado como el agua es una molécula muy abundante en muchas regiones del espacio [3].

1.2. FRIDA

El Gran Telescopio Canarias (GTC) es un telescopio de 10.4 m de diámetro, de los más grandes del mundo en su tipo, esta instalado en La Palma, Islas Canarias, España bajo uno de los mejores cielos para la observación astronómica. En operación desde 2009, éste telescopio español observa cada noche el universo con la tecnología más avanzada (véase Figura 1).

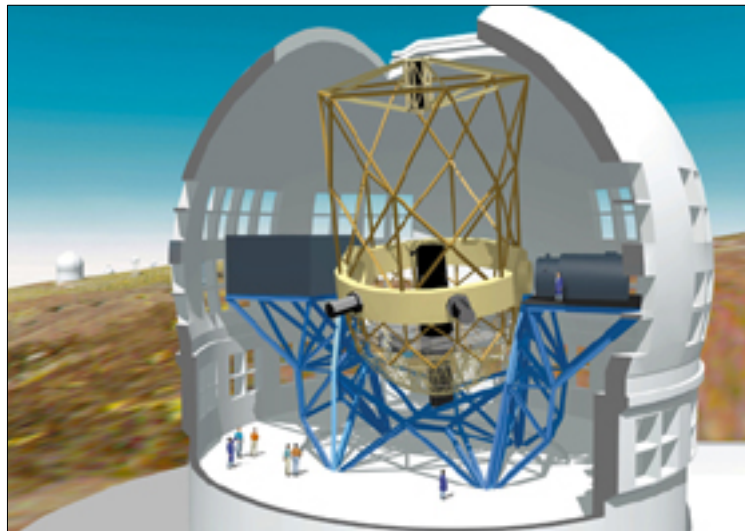


Figura 1: Gran Telescopio de Canarias

FRIDA: Generador de Imagen por Infrarrojo y Disector para el Sistema Óptico Adaptativo del GTC (por sus siglas en inglés) es un instrumento proyectado para formar parte de la llamada segunda generación del GTC, ya que actualmente cuenta con OSIRIS: Sistema Óptico para Imagen y Espectroscopía Integrada de Resolución baja e intermedia (por sus siglas en inglés) el cual trabaja en el rango visible, y puede realizar espectroscopía de varios objetos a la vez (véase Figura 2) [4].

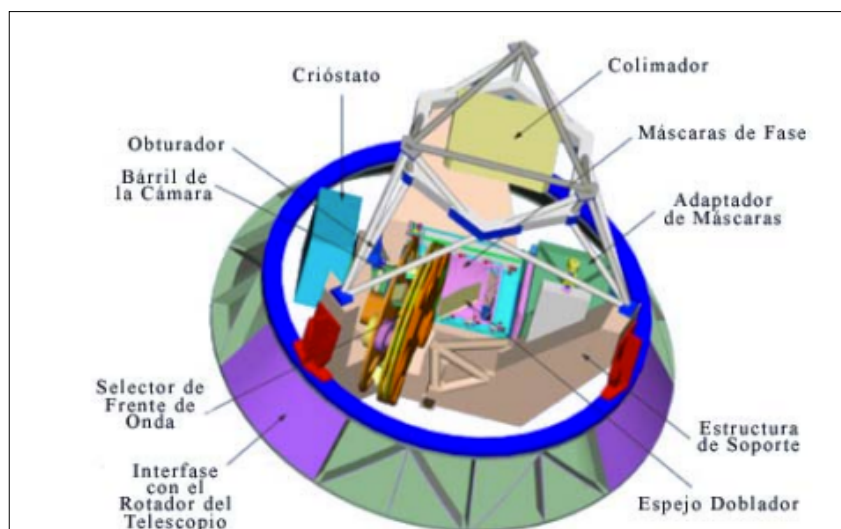


Figura 2: Instrumento OSIRIS

Este instrumento incorpora, entre otros avances tecnológicos desde un punto de vista instrumental, el uso de filtros sintonizables. Estos filtros permiten observar de manera muy precisa una línea determinada del espectro de luz, situada en cualquier posición dentro del rango visible.

Los filtros sintonizables hacen de OSIRIS un instrumento único, novedoso y competitivo, exponente de la innovación y desarrollo tecnológico que exigen los instrumentos para grandes telescopios”.

Un filtro es un elemento óptico tratado que se interpone en el camino de la luz hacia el detector y que permite seleccionar las longitudes de onda o disminuir la intensidad de la luz que llega al detector del instrumento. Para poder obtener la mayor cantidad de información posible en cada observación, serían necesarios numerosos filtros [5].

Estos filtros permiten variar a voluntad (sintonizar) tanto la longitud de onda como el ancho de banda o rango espectral que dejan pasar. Se trata de dos láminas de vidrio extraordinariamente planas y paralelas, muy próximas entre sí, con un recubrimiento reflectante interior. La parte del espectro, así como el rango espectral (ancho de banda) que se desea observar, viene determinada por la separación entre las láminas, que se puede cambiar en tan sólo una décima de segundo”.

Por otra parte FRIDA cuyo diseño y construcción está liderado por el Instituto de Astronomía de la UNAM, trabajará en el rango de la luz infrarroja y podrá alcanzar un poder de resolución comparable al de los telescopios espaciales. Utilizará un método denominado óptica adaptativa con el que se consigue corregir en tiempo real los efectos producidos por la turbulencia ocasionada por la atmósfera (véase Figura 3) [5].

Cuanto más turbulenta es la atmósfera, las trayectorias de los rayos de luz que vienen de los astros se hacen más erráticas, generando imágenes menos definidas y limitando así la capacidad de distinguir objetos que están muy juntos.

Así de esta manera se podrán obtener tanto imágenes como espectroscopía infrarroja de campo integral con una inigualable resolución, con lo que se podrá estudiar las composiciones químicas y las propiedades físicas de los materiales que componen el Universo. Esta última es una característica única de éste versátil instrumento que le da una ventaja importante sobre otros que existen en el mundo y que permitirá hacer estudios cinemáticos y de regiones tan pequeñas como las contenidas en áreas del cielo menores a un segundo de arco. La cámara de FRIDA va a permitir tomar imágenes con una resolución del orden de decenas de milisegundos de arco, en otras palabras, con ella se podría distinguir una moneda de un peso a más de 100 km de distancia.

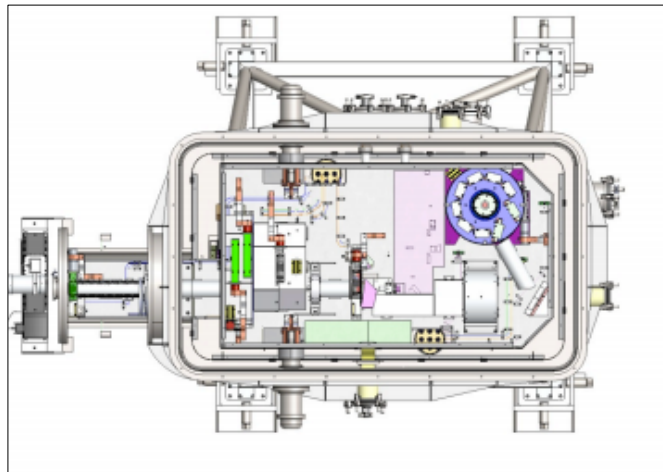


Figura 3: Instrumento FRIDA

Cabe mencionar que los instrumentos infrarrojos son especialmente sensibles a pequeños aumentos de la temperatura, por lo que el equipo estará operando a temperaturas de $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$.

1.2.1 Óptica para el modo de imagen de FRIDA.

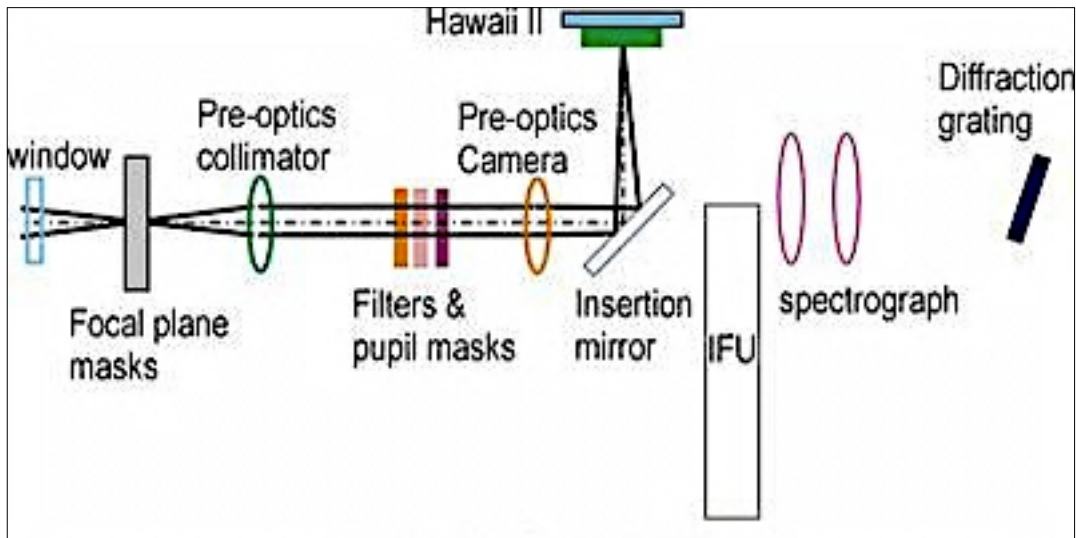


Figura 4: Modo imagen del instrumento FRIDA

La imagen producida por el telescopio (GTC) se enfocará sobre una rendija la cual define el tamaño y la porción de la imagen de la cual se necesita obtener el espectro. Una vez obtenida la imagen se coloca un colimador el cual sirve para producir un haz de luz paralelo cuya dimensión coincida con las dimensiones del detector (véase Figura 4).

Posteriormente se colocan máscaras las cuales sirven para delimitar el área efectiva de salida donde se formará la imagen capturada por el observador. Estas máscara pueden ser de rendija larga, de fotometría rápida, para modos con desplazamiento de carga, para modos con transferencia de imagen (que se fabrican de una sola pieza) y de espectroscopía multiobjeto (multirrendija, que constan de una lámina sobre la que se tallan las rendijas y del marco sobre el que se monta la lámina).

Esta última se diseña a petición del astrónomo para cada proyecto científico en específico, utilizando programas especialmente destinados al efecto bajo estudio. Cada máscara por lo regular tiene un código de barras, por lo que el lector busca la máscara y realiza el proceso de instalación.

También se colocan filtros de banda ancha y angosta cerca del plano focal de la máscara para posteriormente mediante una de las tres cámaras instaladas en éste instrumento (fina, media o gruesa) y un espejo, formar la imagen en el detector (HAWAII-II) con un formato de 2048×2048 píxeles y el cual tendrá una sensibilidad de 0.9 a 2.5 micras.

Filtros de banda ancha

Los Filtros de Banda Ancha, también conocidos como los: Deep Sky, LPR, SkyGlow, Type_1, Broadband. Eliminan las longitudes correspondientes al vapor de Hg (mercurio) y Na (polución lumínica) y dejan pasar el resto [6].

Tienen una transmisión de luz del $\pm 90\%$ con lo que se consigue un cierto incremento en el contraste respecto a la luz de fondo, la cual se vuelve más oscura. Estos filtros se recomiendan para realizar astrofotografías dado que se perciben ciertas ventajas al evitar que la película se sature tan rápido debido a la claridad artificial del cielo, evitando que las fotografías aparezcan con un fondo verdoso o anaranjado.

Filtros de banda angosta

Los Filtros de Banda Angosta, también conocidos como: "UHC" (Ultra High Contrast), Narrowband, Type_2, Ultrablock. Eliminan todo el espectro visible excepto algunas longitudes de onda (colores) muy concretos como los que generan las nebulosas de emisión y las nebulosas planetarias [6].

Las nebulosas que podemos ver en el firmamento emiten básicamente en estas longitudes de onda:

486,1 <i>nm</i>	Producida por el "Hb"	Hidrógeno ionizado
495,9 y 500,7 <i>nm</i>	Procedentes del "O-III"	Oxígeno doblemente ionizado

Si dejamos entrar la luz que procede de esos elementos y eliminamos el resto, obtendremos una imagen muy contrastada del astro, ya que el fondo aparecerá muy oscurecido.

Con esos filtros conseguimos, además, percibir detalles finos que pueden no ser visibles sin ellos, pues al aumentar el contraste con el fondo, la nebulosa se realza y es posible detectar detalles que seríamos incapaces de ver sin la ayuda del filtro.

1.2.2. Óptica para el modo de espectroscopía de campo integral de FRIDA.

El colimador, los filtros, las máscaras, y las cámaras también se usarán en el modo de espectroscopía de campo integral. Sin embargo, se cambiará un espejo plano para que la cámara no forme una imagen sobre el detector sino sobre un rebanador de imágenes en la unidad de campo integral (IFU, por sus siglas en inglés). Después de la unidad de campo integral, el haz pasará por un espectrógrafo de doble paso antes de ser enfocado en el detector (véase Figura 5).

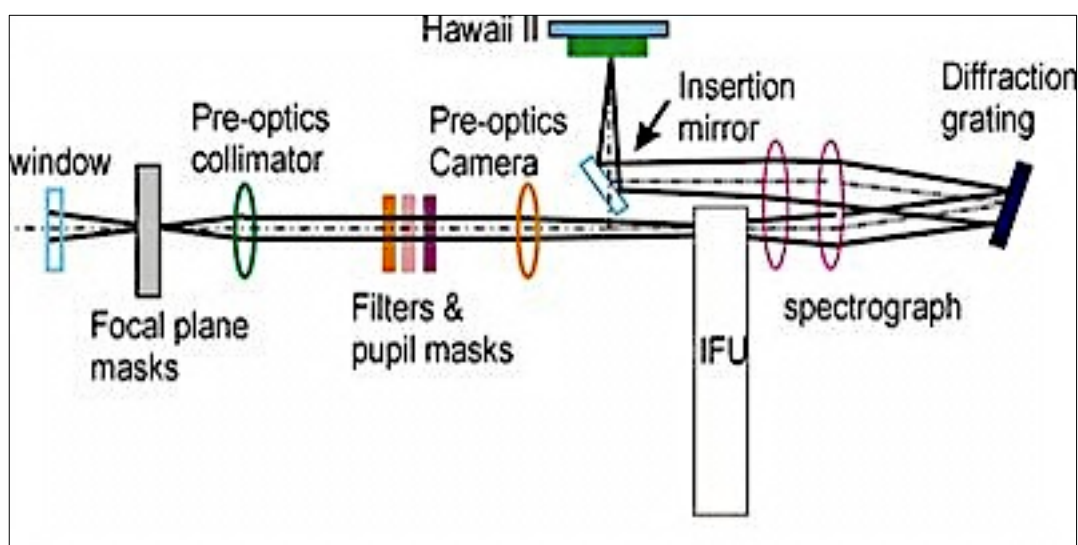


Figura 5: Modo espectroscopía del instrumento FRIDA

El rebanador de imágenes se desarrollará tomando como base el rebanador de imágenes de FISICA². Su formato será de 30 rebanadas cada una de 66 píxeles.

La óptica del espectrógrafo será de tamaño ampliado para mitigar los efectos de difracción por las rebanadas. Las cámaras proporcionarán escalas espaciales aproximadamente de $0.010'' \times 0.020''$, $0.020'' \times 0.040''$ y $0.040'' \times 0.080''$ por spaxel. (Un spaxel es el tamaño de un píxel paralelo a la rebanada por el ancho de la rebanada perpendicular a la rebanada.) Los campos correspondientes serán aproximadamente de $0.6'' \times 0.6''$, $1.2'' \times 1.2''$ y $2.4'' \times 2.4''$.

² Rebanador de imágenes Florida para Cosmología y Astrofísica en el Infrarrojo diseñado para el espectrógrafo multiobjetos FLAMINGOS

La resolución de un espectrógrafo se define como:

$$R = \lambda / \Delta\lambda \quad (1.1)$$

Donde:

R .- Resolución

λ .- Longitud de onda de la línea

$\Delta\lambda$.-Diferencia entre la longitud de onda de dos líneas cercanas

Esta última expresión (1.1) representa la capacidad de separar claramente dos líneas del espectro cercanas entre sí, de tal forma que puedan ser determinadas sus respectivas longitudes de onda. Los espectrógrafos se clasifican de acuerdo a la resolución con la que pueden separar las líneas del espectro:

Baja resolución: $R < 1000$
Media resolución: $1000 < R < 10,000$
Alta resolución: $R > 10,000$

Varias rejillas de difracción de FRIDA proporcionarán resoluciones espectrales aproximadamente de 1000, 4000 y 30,000.

1.2. Justificación

Este trabajo surge de la necesidad de poder medir las fuerzas que interactúan en las lentes de FRIDA, es decir, tanto la pre-óptica, óptica como el espectrógrafo, están basados en dobletes acromáticos de CaF₂ y S-FTM16. Éstos deben de estar montados de tal forma que se asegure la integridad de las lentes durante el enfriamiento para llegar a temperatura de operación, así como durante el calentamiento del sistema. Para esto los gradientes térmicos en las lentes deben ser menores que 5.2 grados. Además los requerimientos de ensamble, integración y verificación (AIV) exigen que el sistema de montaje deba mantener a las lentes alineadas en temperatura ambiente y con una incertidumbre no mayor a $\pm 30 \mu\text{m}$ de desplazamiento (ver Figura 6).

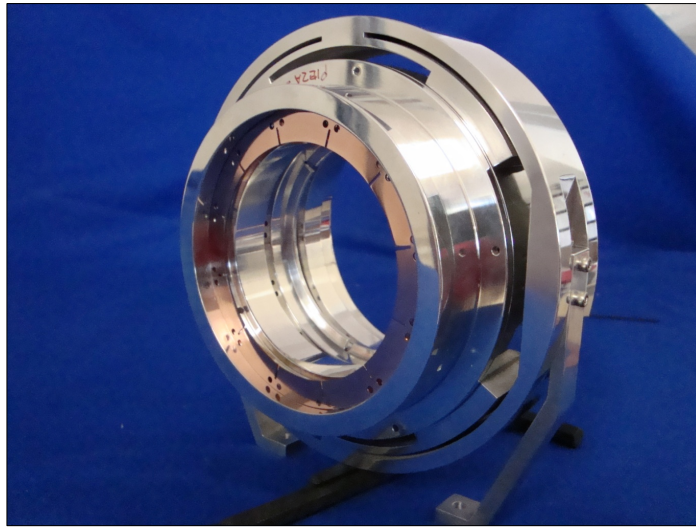


Figura 6: Sistema optomecánico del colimador de FRIDA (note los flejes de sujeción del barril que soportan las lentes)

Se sabe que cuando se inicia el proceso de enfriamiento de las lentes en un sistema criogénico, la montura mecánica (de metal) alcanza muy rápidamente su temperatura de operación mientras que las lentes tardan más tiempo en enfriarse por lo que es necesario estimar las precargas a las que es sometida las lentes por los flejes para evitar que en el proceso de enfriamiento y calentamiento estas se fracturen, de igual forma los flejes deben estar diseñados para que estos soporten los movimientos de las lentes y de la mecánica y auto centrar las lentes en su eje mecánico.

Todo éste análisis se hace mediante elemento finito el cual es muy complejo y no siempre representa lo que sucede en la realidad. Se propone usar la técnica de interferometría de moteado ESPI en plano y fuera de plano para analizar los efectos de la precarga de los flejes de sujeción hacia las lentes en temperatura ambiente y corroborarlo con las simulaciones de elemento finito.

1.3. Objetivo

El objetivo de esta tesis esta basado en la construcción de un sistema interferométrico fiable, de bajo costo y que cuente con una resolución capaz de determinar las deformaciones en tiempo real a las que es sometido un sistema optomecánico, desde una pequeña placa hasta un sistema conformado por flejes ópticos capaces de autocentrarse.

De éste mismo modo también se pretende verificar la técnica utilizada mediante software de cómputo a través del Análisis por Elemento Finito cuyos resultados serán comparados para verificar su viabilidad y en caso de ser la adecuada poder utilizarla de manera directa sobre el instrumento astronómico FRIDA.

De igual manera se proporcionarán nuevos datos experimentales asociados a aplicaciones en el campo de la interferometría electrónica de patrones de motas (ESPI).

1.4. Alcances y limitaciones.

- Debido a que el instrumento FRIDA actualmente se encuentra en construcción, nuestro trabajo se enfocará principalmente al estudio de deformaciones en placas metálicas y a temperatura ambiente, con lo que se dará un primer paso para la validación de éste proyecto.
- En éste trabajo nos limitaremos únicamente al estudio de superficies rugosas, esto debido principalmente a que la técnica ESPI requiere haces de luz difusos para su funcionamiento, es decir que la reflexión de todos los rayos de luz no deben ser reflejados en la misma dirección.

CAPÍTULO

II.- Marco teórico

En éste capítulo se abordarán aspectos fundamentales de óptica para poder entender el funcionamiento de la técnica ESPI, además se analizarán sus propiedades y características para la formación de speckle y se revisará a fondo el fenómeno de interferencia en el cual se basa dicha técnica.

2.1. Funcionamiento de un láser

Láser es un acrónimo que significa literalmente “Amplificación de Luz por Emisión Estimulada de Radiación”. Esto significa que la fuente de luz emite fotones por medio de un mecanismo que se conoce como emisión estimulada. La emisión estimulada es un fenómeno cuántico que puede entenderse de forma bastante intuitiva. La idea es que un átomo, que ya se encuentra excitado por una fuente de energía externa, produce un fotón de la misma frecuencia, fase, polarización y dirección que otro fotón incidente. Al final del proceso se obtienen dos fotones prácticamente idénticos[1].

Como cualquier material contiene en general un elevado número de átomos, si éste proceso se repite en varios átomos distintos, podemos tener un efecto de cascada que da lugar a una amplificación óptica. El resultado final de éste proceso de amplificación reiterada de la luz es un láser.

Casi todos los láseres comparten un diseño semejante. Las partes básicas de un láser son [2]:

- Un medio activo, que produce la amplificación óptica y puede ser un sólido, líquido, gas o plasma.
- Una fuente de energía externa, que produce el bombeo óptico inicial. Por ejemplo, una lámpara de destellos de xenón.
- Una cavidad resonante (Fabry-Perot), que suele estar formada por dos espejos paralelos que encierran el medio activo de amplificación. Uno de los espejos es totalmente transparente y el otro tiene una pequeña transparencia para permitir la salida de fotones láser. Esto obliga a los fotones generados a recorrer el medio activo numerosas veces aumentando así el efecto de cascada.

Existen muchos tipos de láseres en función del medio activo y del tipo de luz emitida. Por ejemplo, existen láseres *continuos* y láseres *pulsados*. En los láseres continuos la luz se emite de forma ininterrumpida, mientras que en los pulsados la luz sale sólo durante un corto intervalo de tiempo en secuencias de disparo sucesivas.

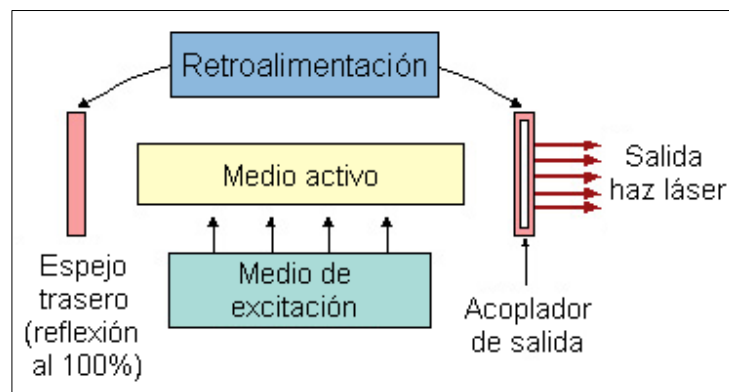


Figura 7: Esquema básico del funcionamiento de un láser.

2.2. Fenómenos de la luz

Existen tres procesos foto-físicos que afectan la propagación de la luz en un medio [3]:

Refracción y reflexión: Si se tiene un haz de luz incidiendo sobre una superficie, el hecho de que una parte se transmita al siguiente medio se le denomina refracción. Por otro lado el fenómeno de que parte de la luz regresa al medio de incidencia es denominado reflexión. La reflexión puede realizarse de dos formas:

Reflexión especular: Éste tipo de reflexión ocurre en superficies suaves en la que toda la luz reflejada sale en la misma dirección debido a que los rayos llegan con el mismo ángulo en una superficie plana.

Reflexión difusa. Debido a que las superficies tienen cierto grado de rugosidad, la reflexión de todos los rayos de haz de luz no se reflejan en la misma dirección provocando lo que se conoce como luz difusa.

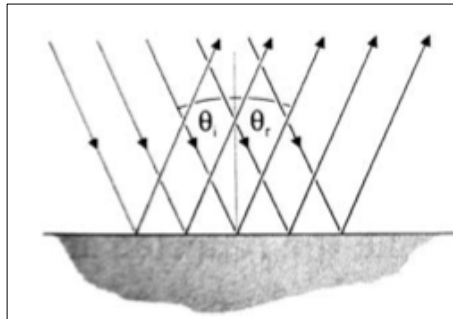


Figura 8: Reflexión especular.

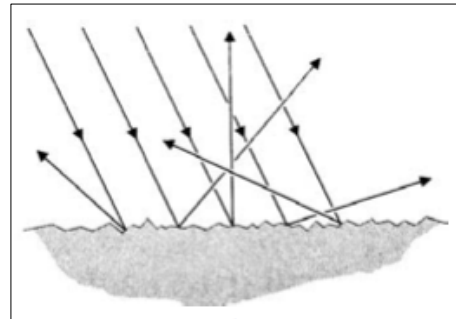


Figura 9: Reflexión difusa.

La reflexión y transmisión de la luz, cuando esta incide en la interfaz de dos materiales con índices refractivos diferentes, sigue la ley de Snell:

$$n_1 \sin \varphi_1 = n_2 \sin \varphi_2 \quad (2.1)$$

Donde n_1 , n_2 ³ son los índices de refracción de ambos materiales, y φ_1 , φ_2 los ángulos de la luz con la normal a la frontera entre ambos medios.

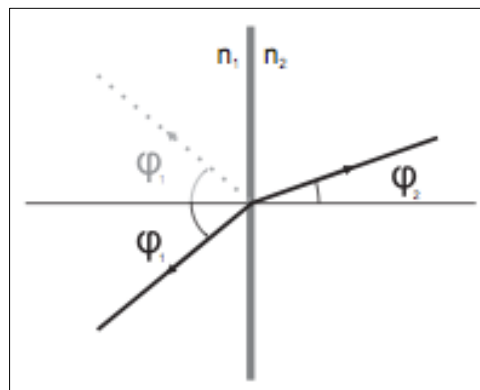


Figura 10: Reflexión y refracción de la luz en una interfaz.

³ Se denomina índice de refracción a la relación entre la velocidad de la luz en el vacío y la velocidad de la luz en el medio, $n = c / v$

Dispersión: Cuando un fotón encuentra una no-uniformidad en el medio es forzado a desviar su trayectoria. El cambio de dirección tiene cierta aleatoriedad que, a veces, es utilizada para caracterizar a los dispersores (en inglés scatterers). Si se considera a la luz como un fenómeno ondulatorio, puede verse como una onda plana incidiendo sobre una partícula dispersora.

Puede calcularse la radiación dispersada si se conocen los índices de refracción de los dos materiales y la forma del dispersor. Esta también depende de la polarización de la luz incidente.

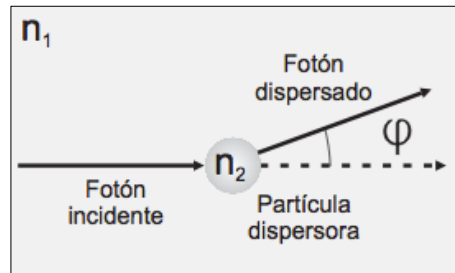


Figura 11: Alteración en la dirección de un fotón al ser dispersado.

Absorción: La absorción es un proceso en el cual una partícula (átomo o molécula) puede extraer energía a un fotón. Una caída de nivel de alta energía a otro de baja energía es llamado decaimiento y está acompañado de la liberación de energía igual a la diferencia de energía de los dos niveles. Esta liberación puede ocurrir sin radiación, liberando calor al medio o emitiendo un fotón.

2.2. Concepto de speckle

“Denominamos speckle, a la distribución de intensidad al azar que se forma cuando un haz de luz coherente (en este trabajo, láser) se refleja en una superficie rugosa a escala de la longitud de onda y se propaga a través de un medio con fluctuaciones del índice de refracción” [4].

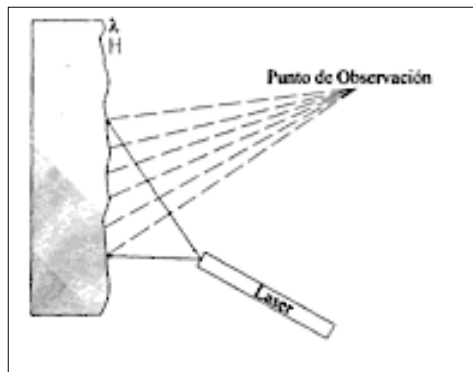


Figura 12 : Formación de un patrón de speckle.

Este fenómeno se puede explicar de un modo intuitivo mediante la interferencia que se produce de dos o más ondas en un punto del espacio en un instante determinado, como se observa en la Figura 12.

Es decir, si hacemos incidir sobre una superficie rugosa una luz láser y estudiamos en un punto exterior (punto de observación) a una determinada distancia la perturbación resultante, esta se compone de muchas ondas coherentes (función del área iluminada) y desfasadas (función de la rugosidad del material de la superficie iluminada) pero de la misma longitud de onda dando lugar a un fenómeno de interferencia en forma de granos, tal como se muestra en la Figura 13.

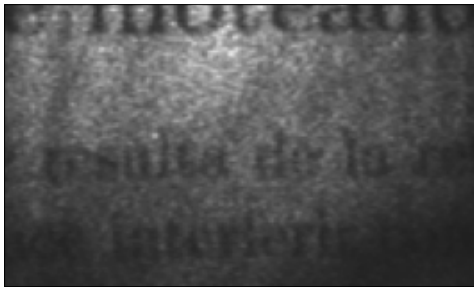


Figura 13: Fotografía de un fragmento de texto tomada bajo iluminación coherente (láser).

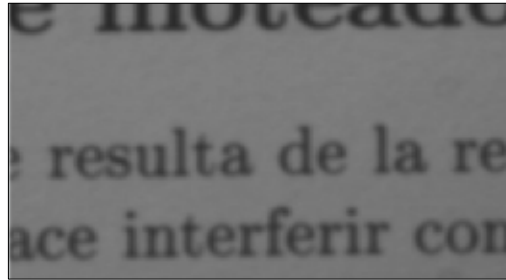


Figura 14: Fotografía de un fragmento de texto tomada bajo luz natural.

Cuando se utiliza una luz no coherente, la distribución del patrón de interferencia en cada punto se convierte en un promedio temporal de la intensidad, que es bastante uniforme. Esto explica la ausencia de speckles cuando se observan objetos rugosos bajo luz natural, tal como se muestra en la Figura 14.

Cabe debe hacer notar que si los objetos dentro del plano de observación se mueven, los granos también se mueven y cambian su forma. De esta manera, el patrón de speckle depende del tiempo.

La medida de estos speckles es función de la longitud de onda de la luz, el ancho del haz que ilumina la superficie bajo estudio y la distancia de ésta a la plano donde se forman los mismos. Ocurre cuando el ángulo de dispersión hace que la diferencia de caminos relativos entre la luz dispersada desde el centro del área iluminada al borde difiera en más de una longitud de onda.

2.3. Formación de speckle

La formación de speckle se obtiene mediante la premisa de que la longitud de onda de la fuente de luz monocromática⁴ sea menor a un micrómetro, esto para garantizar que la diferencia entre cada pico y valle de la superficie rugosa provoque el desplazamiento de al menos una longitud de onda tal y como se muestra en la Figura 15, de lo contrario no será posible ser detectarlo por el sistema óptico de captación y registro (CCD).

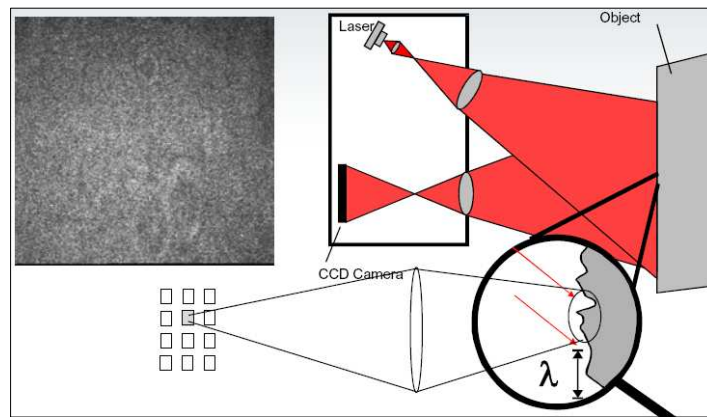


Figura 15: Formación de speckle.

Como se analizó previamente, una distribución de speckle se forma cuando una onda monocromática ilumina a un medio ópticamente rugoso, sin embargo el análisis del speckle se simplifica si se asumen las siguientes características [5]:

- La luz utilizada debe ser monocromática, coherente y esta polarizada linealmente⁵.
- El medio dispersor no despolariza la luz, es decir que la luz difundida también esta polarizada linealmente.
- El número de elementos dispersores que contribuyen a la formación del speckle es muy grande y del mismo orden de magnitud para todos los puntos de la distribución.
- Las áreas dispersoras de la superficie no están correlacionadas entre si y la amplitud de una componente dada, no guarda relación con su fase. Por lo tanto, la amplitud y fase de las ondas elementales que originan el speckle son variables aleatorias independientes entre si.

⁴ La luz monocromática es aquella que está formada por componentes de un solo color. Es decir, que tiene una sola longitud de onda, correspondiente al color.

⁵ Una onda electromagnética esta polarizada linealmente si en cualquier punto del espacio, el vector del campo eléctrico oscila arriba y abajo a lo largo de una línea vertical.

2.3.1. Speckle Objetivo.

El origen de su nombre se debe principalmente a que no depende de un sistema óptico para visualizarlo, es decir, el láser ilumina directamente la muestra y de ésta misma se recogen los haces de luz interferentes sobre una pantalla a una distancia determinada. Éste caso es el más sencillo pues no existen factores externos que modifiquen la amplitud de los haces, por lo que es más fácil medir la magnitud del speckle (véase Figura 16) [6].

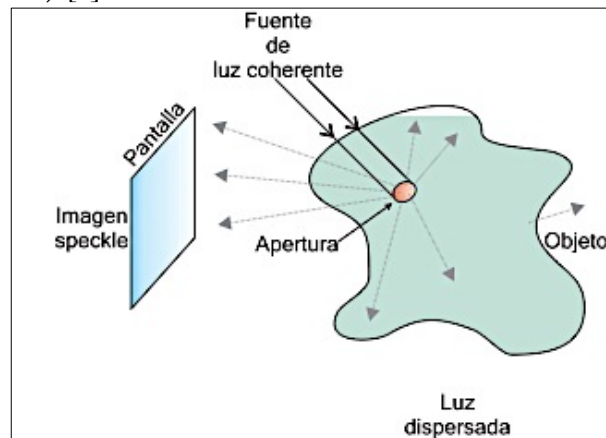


Figura 16: Formación de speckle objetivo.

En éste caso, el tamaño medio de un grano (speckle) depende únicamente de la longitud de onda del haz incidente, del área iluminada y de la distancia de la superficie rugosa al plano de observación.

$$S = \frac{\lambda d}{L} \quad (2.2)$$

Donde: λ .- Longitud de onda de la fuente de luz coherente (láser).

d .- Es la distancia de la lente al plano de observación.

L .- Es el diámetro de la zona de la superficie iluminada.

2.3.2. Speckle Subjetivo.

Cuando se utiliza un sistema óptico de captación de imágenes (lentes o cámaras) éste influye en las amplitudes interfirientes, de modo que el moteado final viene originado por la concurrencia de factores superpuestos a la rugosidad de la superficie, por ejemplo si la apertura de la lente cambia, también lo hace la medida el tamaño de los speckles. Si la posición del sistema formador se altera, el patrón cambiará gradualmente y eventualmente no estará relacionado con el patrón observado originalmente. La Figura 17 muestra el esquema óptico que reproduce éste fenómeno [6].

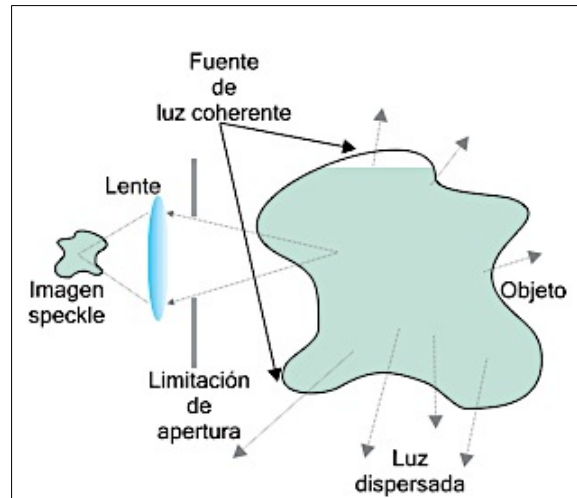


Figura 17: Formación de speckle subjetivo.

Supongamos que se desea obtener una imagen de la superficie que produce la distribución de speckle mediante un sistema óptico formado por una lente y un diafragma de apertura circular, tal como se muestra en la Figura 18 [7].

En éste caso el speckle se denomina subjetivo. Debido a la presencia de la lente, las variaciones de intensidad en el plano de observación tienen su frecuencia espacial acotada por el límite de difracción y de éste modo queda determinado el mínimo tamaño de grano de speckle que se puede observar.



Figura 18: Sistema óptico y diafragma circular (speckle subjetivo).

En la Figura 18 se observa que una pequeña región alrededor del punto P_1 de la superficie difusora forma una figura de difracción centrada en el punto Q del plano de observación, mientras que otra pequeña área centrada en P_2 produce el mismo efecto en Q' . Cada una de estas figuras de difracción está constituida por discos de Airy, con amplitud predominantemente concentrada en el lóbulo principal y con fase aleatoria dependiendo de la altura de la superficie dispersora.

Como P_1 y P_2 fueron elegidos de tal forma que la distancia entre Q y Q' sea igual a la mitad del ancho del lóbulo principal de la Figura de difracción, no existe interferencia constructiva apreciable entre ellos. Por esta razón, las contribuciones mas relevantes en

Q están generadas por los aportes de las vecindades de P1, las cuales se encuentran a una distancia menor a $|P1 - P2|$. Por lo tanto, el tamaño medio de un grano de speckle en el plano de observación se estima como el radio del disco de Airy, o sea:

$$S = \frac{1.22\lambda z}{D} \quad (2.3)$$

Donde: D .- Es el diámetro de la pupila de salida del sistema óptico.

z .- Es la distancia de la lente al plano de observación.

λ .- Longitud de onda de la fuente de luz coherente (láser).

El tamaño medio de un grano de speckle también es conocido como celda de resolución. Por lo tanto, cada píxel de la cámara CCD debe ser capaz de detectar correctamente a dicha celda y el tamaño del píxel deber ser igual o menor que la dimensión media del grano de speckle subjetivo.

Si f es la distancia focal de la lente y M_g es su magnificación, entonces:

$$z = f(M_g + 1) \quad (2.4)$$

Tomando en cuenta que la abertura numérica de la lente es $F = f/D$ y reemplazando en la ecuación anterior, se obtiene el tamaño medio de un grano de speckle objetivo sobre el plano de observación es:

$$S = 1.22\lambda F(1 + M_g) \quad (2.5)$$

2.4. Fenómeno de interferencia.

Cuando se hace incidir una onda plana (Λ) sobre una superficie metálica ($S1$), esta actúa como un emisor puntual de ondas prácticamente esféricas que se propagan hacia todo el espacio iluminando cualquier punto situado frente a la superficie (véase Figura 19) [8].

Si se añade otra superficie metálica ($S2$), las ondas procedentes de cada una de ellas interfieren, ocasionando zonas brillantes y zonas oscuras, tal y como se muestra en la Figura 20.

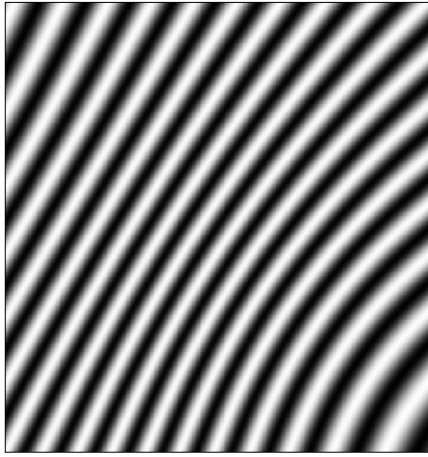


Figura 19: Franjas de interferencia provenientes de la reflexión de un haz láser en dos superficies metálicas

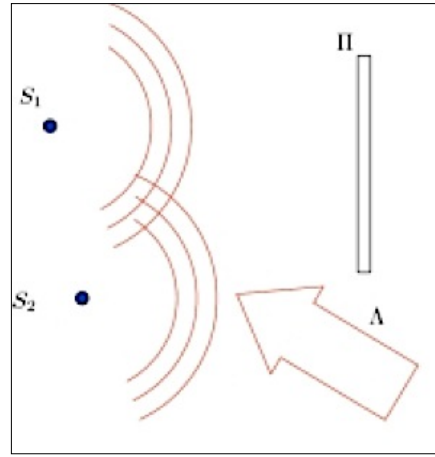


Figura 20: Patrón de franjas sobre un plano de referencia

Desde punto de vista matemático supongamos que tenemos dos ondas de la misma frecuencia propagándose en el mismo sentido, pero de diferente amplitud y fase:

$$A_0 \cos(\omega t - kx + \phi_0) \quad A_1 \cos(\omega t - kx) \quad (2.6)$$

En términos de fasores:

$$A_0 = |A_0| e^{j\phi_0} \quad A_1 = |A_1| \quad (2.7)$$

La intensidad de cada una de las ondas propagándose viene dada por a amplitud de las oscilaciones, la cual está representada por el conjugado del número complejo (fasor).

$$I_0 = A_0 A_0^* = |A_0|^2 \quad I_1 = A_1 A_1^* = |A_1|^2 \quad (2.8)$$

Cuando se sumen estas dos ondas, el resultado será una nueva onda, con un nuevo fasor.

$$A = A_0 e^{j\phi_0} + A_1 = A e^{j\phi} \quad (2.9)$$

Y la intensidad resultante es:

$$\begin{aligned} I &= A \cdot A^* = (A_0 e^{j\phi} + A_1)(A_0 e^{-j\phi} + A_1) \\ I &= A_0^2 + A_0 A_1 e^{j\phi} + A_0 A_1 e^{-j\phi} + A_1^2 \\ I &= A_0^2 + A_1^2 + A_0 A_1 (e^{j\phi} + e^{-j\phi}) \end{aligned} \quad (2.10)$$

Y finalmente mediante de la identidad de Euler:

$$I = A_0^2 + A_1^2 + 2A_0A_1 \cos(\phi) \quad (2.11)$$

Expresando en función de la intensidades:

$$I_{referencia} = I_0 + I_1 + 2\sqrt{I_0 \cdot I_1} \cos(\phi) \quad (2.12)$$

Cualquier cambio de la fase relativo entre los dos frentes de onda causará que la intensidad cambie a:

$$I_{Deformacion} = I_0 + I_1 + 2\sqrt{I_0 \cdot I_1} \cos(\phi + \psi) \quad (2.13)$$

La diferencia de la fase adicional ψ es debida a la deformación o desplazamiento de la superficie bajo de estudio. En particular, si $\psi = \pm\pi/2$ no tendremos un cambio en la intensidad del speckle, esta condición corresponde a una diferencia de camino óptico igual a λ .

Con respecto a las ecuaciones (2.12) y (2.13) la sustracción da:

$$I = |I_{deformacion} - I_{referencia}| \quad (2.14)$$

$$I = 2\sqrt{I_0 \cdot I_1} |\cos(\phi - \psi) - \cos \psi| \quad (2.15)$$

La ecuación (2.15) se puede reescribir como:

$$I = 4\sqrt{I_0 \cdot I_1} \left| \sin\left(\frac{2\phi + \psi}{2}\right) \sin\left(\frac{\psi}{2}\right) \right| \quad (2.16)$$

Esta última expresión representa las franjas de interferencia sobre un plano de referencia y describe dos ecuaciones moduladas entre sí:

- La primera una señal de alta frecuencia espacial (ruido de moteado).
- Y la segunda una señal de baja frecuencia espacial (franjas de interferencia).

Cuando se emplea interferometría electrónica de patrones de motas, en vez de utilizarse un plano de referencia se utiliza un sistema de captación de imágenes en donde se registra una imagen antes y después de la deformación inducida, para posteriormente mediante software de cómputo hacer la sustracción de manera digital y de esta manera obtener el mismo efecto de interferencia y así mismo de modulación (véase Figura 21).

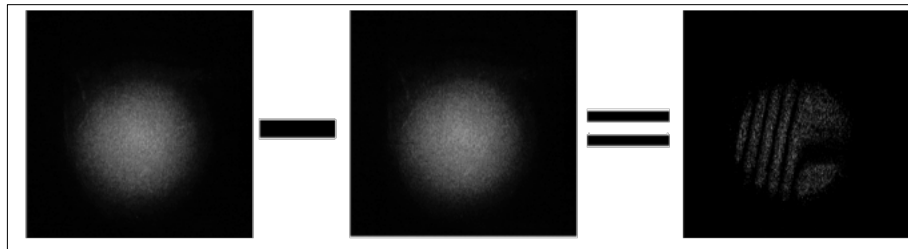


Figura 21: Patrón de franjas de interferencia mediante la sustracción de imágenes.

2.5. Ecuación de una lente delgada.

El parámetro característico de una lente es su distancia focal f' , que relaciona la distancia s del objeto con la de su imagen s' de acuerdo con la ecuación aparece a continuación [9]:

$$\frac{1}{f'} = \frac{1}{s'} + \frac{1}{s} \quad (2.17)$$

En la Figura 22 se presenta el trayecto de algunos rayos para explicar la formación de la imagen; en particular han sido dibujados tres rayos:

- [1] Rayo paralelo al eje óptico, que se refracta pasando por el foco imagen F' .
- [2] Rayo que pasa por el centro óptico de la lente y no se desvía.
- [3] Rayo que incide sobre la lente pasando por el foco objeto y emerge paralelo.

Véase que la distancia s es positiva por encontrarse el objeto en el lugar del cual procede la luz, y que f' y s' son también positivas por encontrarse en el lado al cual se dirige la luz. Los planos objeto e imagen se dicen planos conjugados, pues a cada punto del primero corresponde un punto del segundo. La medida de f' se basa en determinar la distancia a la que aparece la imagen de un objeto situado a una distancia dada.

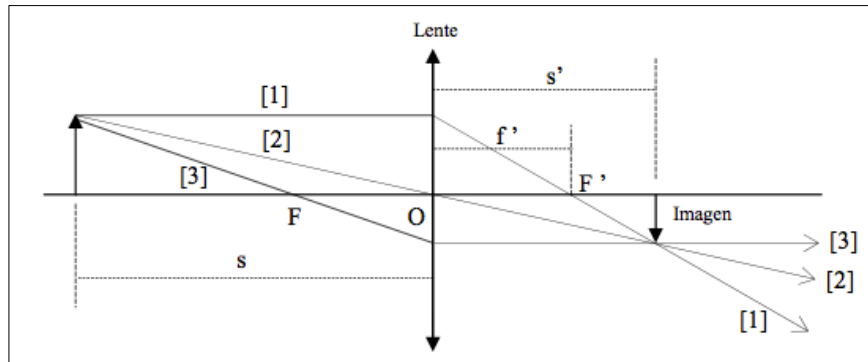


Figura 22: Esquema de la formación de imagen a través de una lente convergente.

2.6. Apertura numérica.

En óptica, la apertura numérica (AN) de un sistema óptico es un número adimensional que caracteriza el rango de ángulos para los cuales el sistema acepta luz. La cual se define mediante la siguiente expresión [10]:

$$AN = n \sin(\theta) \quad (2.18)$$

Donde n es el índice de refracción del medio en el que la lente se encuentra y θ es la mitad del ángulo de aceptación máximo que puede entrar o salir de la lente.

La apertura numérica también es una medida del diámetro de la apertura comparada con la distancia focal. Esta relación viene dada habitualmente con el número F ($\#F$), que para una lente delgada enfocando a un objeto en el infinito vale

$$\#F = \frac{1}{2AN} \quad (2.19)$$

CAPÍTULO

III.- Medición de desplazamientos y deformaciones.

En ESPI dependiendo del diseño experimental, se puede hacer un instrumento sensible a componentes de desplazamiento (configuración fuera del plano) y/o deformaciones (configuración en plano) en campo completo, los cuales se analizan en éste capítulo.

Mediante estas configuraciones se pueden detectar fracturas y/o defectos (internos y externos), debido a que estos producen anomalías en el patrón de franjas observado. Comúnmente esta técnica es comparada con el ultrasonido, ya que ambas proporcionan información de defectos, sin embargo hay 3 puntos a favor de ESPI:

- Los tiempos de detección, mientras ESPI lo hace en menos de un segundo, el ultrasonido tarda varios minutos en la realización del muestreo.
- ESPI puede analizar una fractura en función de los esfuerzos a los que está sometida la muestra, mientras que el ultrasonido no.
- ESPI no requiere, como el ultrasonido en general, de un fluido entre el transductor y el objeto de prueba.

3.1. Fuera de plano.

La configuración conocida como fuera de plano utiliza un esquema parecido a un interferómetro de Michelson, sustituyendo los espejos por superficies rugosas. El haz láser Λ se dirige a las superficies rugosas Σ, Σ' tras pasar por el divisor de haz BS. La luz reflejada por ambas vuelve a atravesar BS y es enfocada por la cámara sobre el plano Π , en el se registra la intensidad resultante de la interferencia. Acercamientos o alejamientos de los puntos de Σ alterarán la fase de la luz reflejada y, por lo tanto, la intensidad proveniente de la interferencia (véase Figura 23) [1,2].

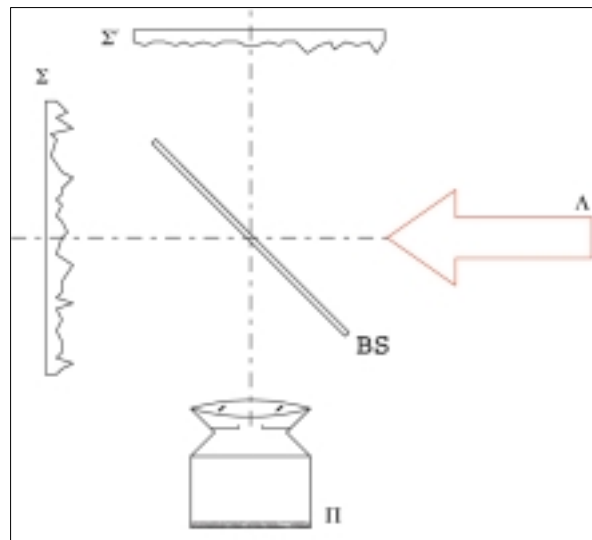


Figura 23: Medición de desplazamientos (Configuración fuera de plano)

Para obtener la información experimentada por Σ , se registran las imágenes de los patrones de interferencia antes y después de inducida la transformación correspondiente (specklegramas). Los puntos de Σ que hayan experimentado un desplazamiento normal que sea múltiplo de una longitud de onda no alterarán su contribución al patrón de interferencia, mientras que cualquier otro desplazamiento modificará dicho patrón. Al restar las intensidades correspondientes a los dos specklegramas registrados, aparecerán franjas oscuras en aquellos puntos de la superficie que se hayan desplazado normalmente una distancia:

$$d = \frac{N \cdot \lambda}{1 + \cos(\alpha)} \quad (3.1)$$

Donde:

- d .-Desplazamiento
- N .-Número de franjas
- λ .-Longitud de onda
- α .-Ángulo de iluminación

Esta última ecuación viene dada por la proyección del ángulo de iluminación con respecto al movimiento en dirección del eje z:

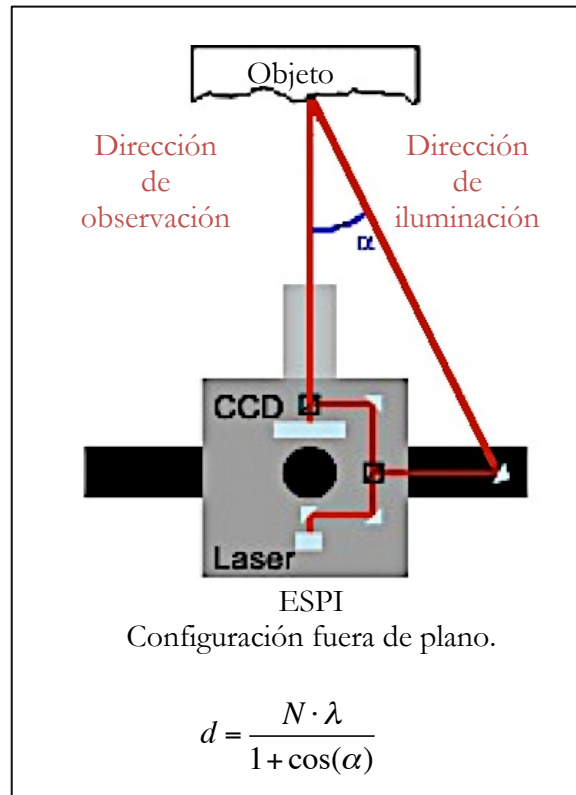


Figura 24: Proyección de las componente de desplazamiento en z.

La componente de desplazamiento en z se mide en un una configuración fuera de plano, como se muestra en la siguiente Figura:

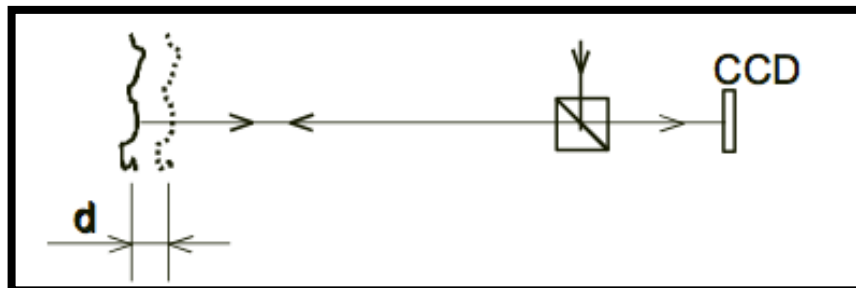


Figura 25: Componente de desplazamiento en z.

3.2. En plano.

Un arreglo óptico sensible en plano, se construye dividiendo un haz de luz láser en dos haces (por medio de un divisor de haz) para posteriormente iluminar directamente la superficie rugosa por medio de dos espejos opuestos pero con ángulos simétricos normales a la superficie bajo estudio como se muestra en la Figura 26 [1,2].

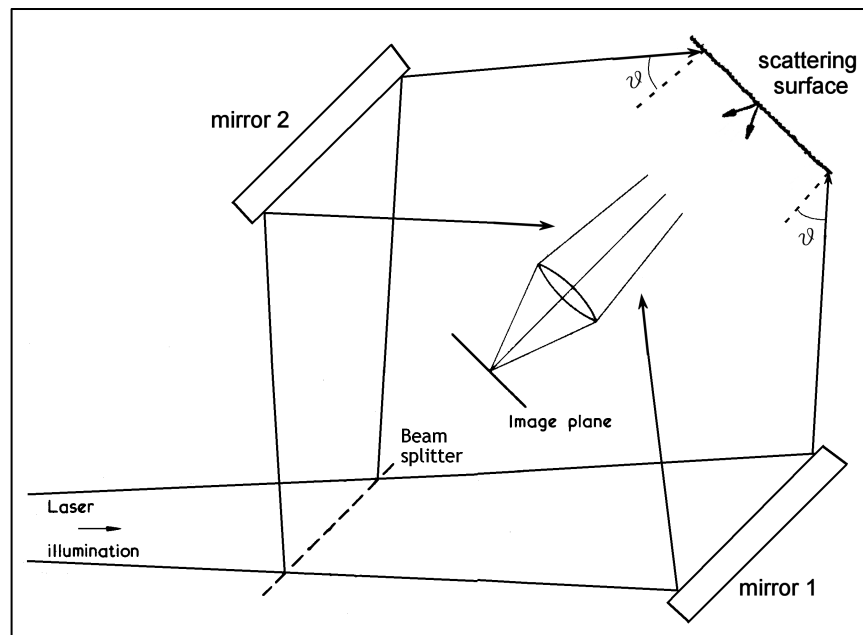


Figura 26: Medición de deformaciones (Configuración en plano).

Para obtener información acerca del desplazamiento generado, basta con obtener el número de franjas en la dirección del campo de visión (plano x,y) formadas a partir de la diferencia de camino óptico entre los dos haces incidentes.

$$d = \frac{N \cdot \lambda}{2 \sin(\alpha/2)} \quad (3.2)$$

Donde:

d .-Desplazamiento

N .-Número de franjas

λ .-Longitud de onda

$\alpha/2$.-Ángulo de iluminación

Esta última ecuación viene dada de la proyección del ángulo de iluminación con respecto al movimiento en dirección del eje y:

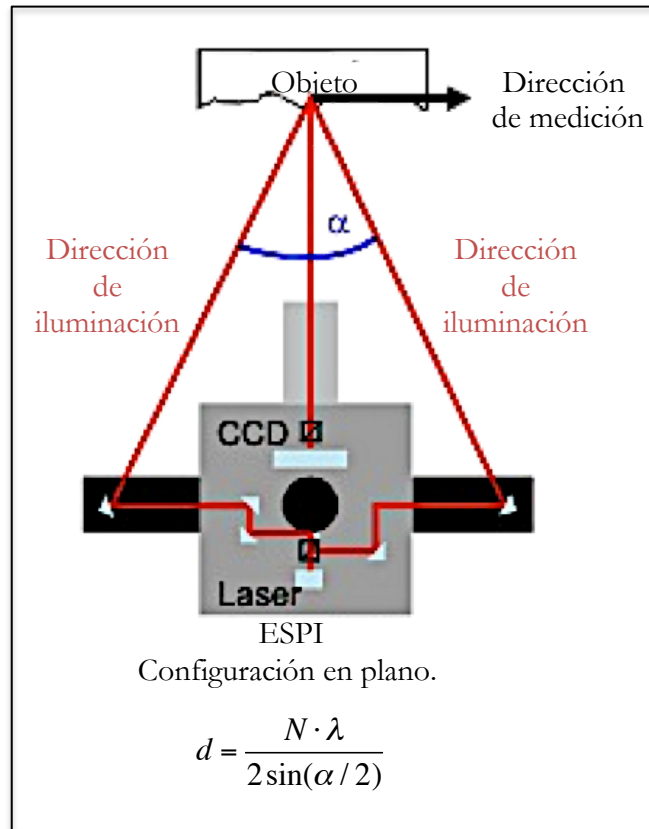


Figura 27: Proyección de las componente de desplazamiento en x,y.

Las componentes de desplazamientos en x, y se miden en un una configuración en plano, como se muestra en la siguiente Figura:

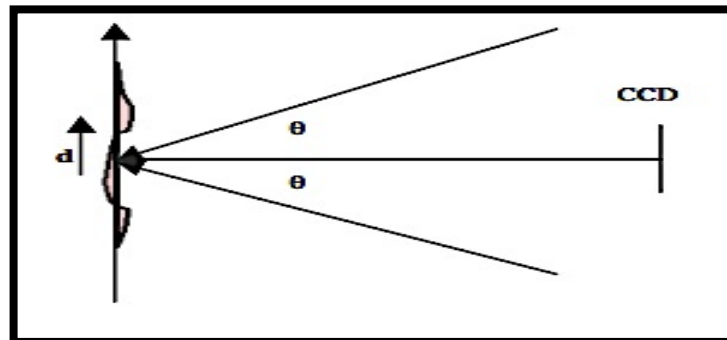


Figura 28: Componente de desplazamiento en x,y.

3.3 Relación entre desplazamiento y fase.

Un interferómetro es siempre sensible a componentes del vector desplazamiento en cualquier punto en el espacio.

La dirección de sensibilidad puede ser definida por un vector unitario $\hat{n}$ llamado vector de sensibilidad. Éste vector está dado por $\hat{n} = \hat{n}_i - \hat{n}_o$, donde $\hat{n}_i$ y $\hat{n}_o$ son los vectores unitarios en la dirección de iluminación y observación, respectivamente. Si el vector desplazamiento de cada punto del objeto es $\vec{d}(x,y,z)$, entonces el interferómetro será sensible a la componente d_n a lo largo del vector sensibilidad [3,4,5]:

$$d_n = \hat{n} \cdot \vec{d} \quad (3.3)$$

El cambio de fase óptica por unidad de desplazamiento es determinado por el número de onda $k = 2\pi / \lambda$. El cambio de fase en el plano imagen debido al cambio de fase en el espacio objeto puede definirse como un factor de sensibilidad de franja, Γ , que determina cuántas franjas corresponden a un dado desplazamiento de la superficie. (Γ también es una función del tipo de iluminación y el desplazamiento de la superficie). Entonces:

$$\phi = k\Gamma d_n \quad (3.4)$$

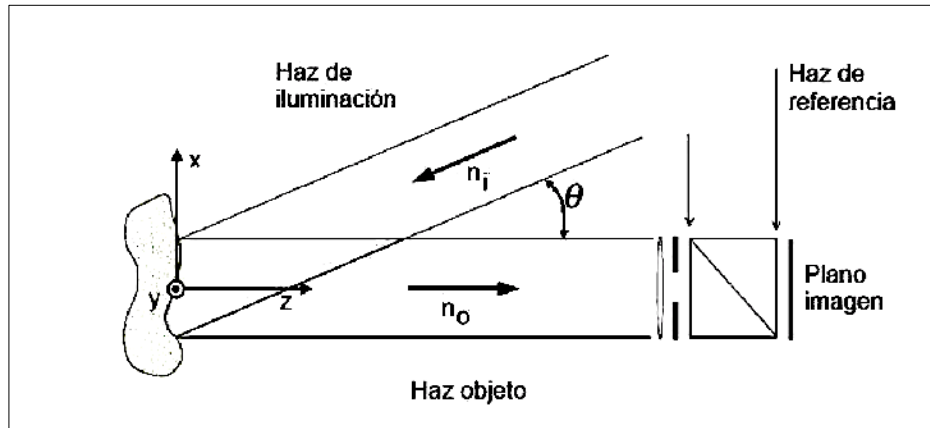


Figura 29: Arreglo fuera de plano (relación entre fase y desplazamiento).

Consideremos el caso de una configuración fuera de plano como se ilustra en la Figura 29. En éste caso la superficie dispersora se ilumina lateralmente con un pequeño ángulo θ respecto al eje de observación.

Teniendo en cuenta el sistema de referencia adoptado, el vector sensibilidad resulta:

$$\begin{aligned} n &= n_i - n_0 = (-\sin\theta\hat{i} - \cos\theta\hat{k}) - (\hat{k}) \\ n &= -(\sin\theta\hat{i} + (1 + \cos\theta)\hat{k}) \end{aligned} \quad (3.5)$$

Donde $\hat{i}$ y $\hat{k}$ son los vectores correspondientes a los ejes x y z, respectivamente.

Teniendo en cuenta que el haz de referencia es uniforme, la variación de fase óptica queda determinada por:

$$\phi = -\frac{2\pi}{\lambda} \cdot [\sin\theta\hat{i} + (1 + \cos\theta)\hat{k}] \quad (3.6)$$

Finalmente, si $\theta = 0$ o es muy pequeño ($< 5^\circ$), se obtiene:

$$\phi = -\frac{4\pi}{\lambda} \hat{k} \quad (3.7)$$

Por lo tanto, en caso de que haya un desplazamiento el sistema solo puede ser considerado sensible al movimiento de $\hat{k}$:

$$\phi = -\frac{4\pi}{\lambda} d_z \quad (3.8)$$

Cabe hacer notar que el signo, depende directamente del sistema de referencia empleado.

Finalmente si comparamos las ecuaciones (3.3), (3.4) y (3.6) el factor de sensibilidad de franja para esta configuración es $\Gamma=2$, y el vector sensibilidad es un vector unitario en la dirección de la observación $\hat{n} = \hat{k}$.

De manera análoga podemos realizar el análisis para una configuración sensible en plano, como se muestra en la Figura 30.

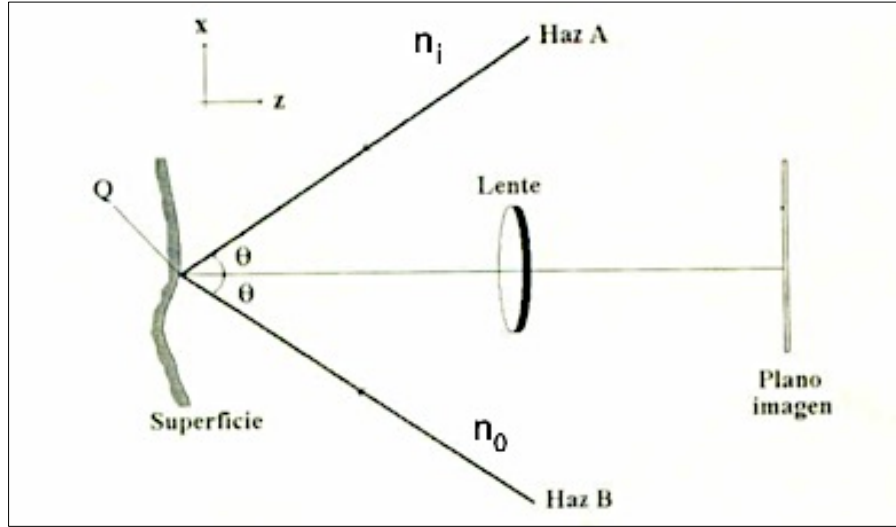


Figura 30: Arreglo en plano (relación entre fase y desplazamiento).

En éste caso la superficie dispersora se ilumina lateralmente con dos haces, ambos con el mismo ángulo de incidencia θ respecto al eje de observación.

Teniendo en cuenta el sistema de referencia adoptado, el vector sensibilidad resulta:

$$\begin{aligned}
 n &= n_i - n_0 \\
 n_i &= -\sin(\theta)\hat{i} + (1 - \cos(\theta))\hat{k} \\
 n_0 &= \sin(\theta)\hat{i} + (1 - \cos(\theta))\hat{k} \\
 n &= -2\sin(\theta)\hat{i}
 \end{aligned} \tag{3.9}$$

Donde $\hat{i}$ y $\hat{k}$ son los vectores correspondientes a los ejes x y z, respectivamente.

La variación de fase óptica queda determinada por:

$$\phi = -\frac{2\pi}{\lambda} \cdot [2\sin(\theta)\hat{i}] \Rightarrow \phi = -\frac{4\pi}{\lambda} \cdot \sin(\theta)\hat{i} \tag{3.10}$$

Por lo tanto, en caso de que haya un desplazamiento el sistema solo puede ser considerado sensible al movimiento de $\hat{i}$:

$$\phi = -\frac{4\pi}{\lambda} d_x \sin(\theta) \quad (3.11)$$

Cabe hacer notar que el signo, depende directamente del sistema de referencia empleado.

Finalmente si comparamos las ecuaciones (3.3), (3.4) y (3.10) el factor de sensibilidad de franja para esta configuración es $\Gamma = 2\sin(\theta)$, y el vector sensibilidad es un vector unitario en la dirección de la observación $\hat{n} = \hat{i}$.

Si se requiere observar el plano yz debemos rotar los haces de iluminación con respecto al eje de observación para que el sistema pueda ser considerado sensible al movimiento de $\hat{j}$, haciendo el análisis pertinente se obtiene que $\Gamma = 2\sin(\theta)$ y $\hat{n} = \hat{j}$.

Y por lo tanto el cambio de fase debido a desplazamientos en $\hat{j}$ es:

$$\phi = -\frac{4\pi}{\lambda} d_y \sin(\theta) \quad (3.12)$$

CAPÍTULO

IV.- Análisis de deformaciones en sistemas optomecánicos Mediante ESPI.

Una vez descritos los antecedentes y los fundamentos teóricos en los capítulos 1 y 2, se cuenta con las bases necesarias para el desarrollo del montaje experimental, el cual se presenta en éste capítulo. El propósito de éste es el de describir las dos configuraciones realizadas para la medición de fuerzas que actúan en sistemas optomecánicos y analizar de manera cuantitativa las componentes de desplazamiento (x,y,z) del sistema bajo estudio.

4.1. Análisis de tolerancias.

La determinación tolerancias viene dada por las incertidumbres en cada uno de los instrumentos de medición utilizados, lo cual es una parte fundamental para la realización de éste trabajo debido a que estos nos condicionan la fiabilidad de los resultados alcanzados tras el análisis, es decir, con ello obtenemos información respecto a que tan preciso puede llegar a ser nuestro sistema interferométrico para la medición de franjas de interferencia y por consiguiente el análisis de deformaciones.

Para la medición de desplazamientos se utilizó un micrómetro de precisión con las siguientes características:



Figura 31: Micrómetro mitutoyo modelo ID-C112EBS

Rango de medida: 1-10 mm
Resolución: 0.001 mm
Incertidumbre: ± 0.0005 mm

Para la medición de ángulos se utilizo un goniómetro:



Figura 32: Goniómetro Salooja Brothers PVT. LTD.

Rango de medida: 0-360°
Resolución: 30"
Incertidumbre: $\pm 15''$

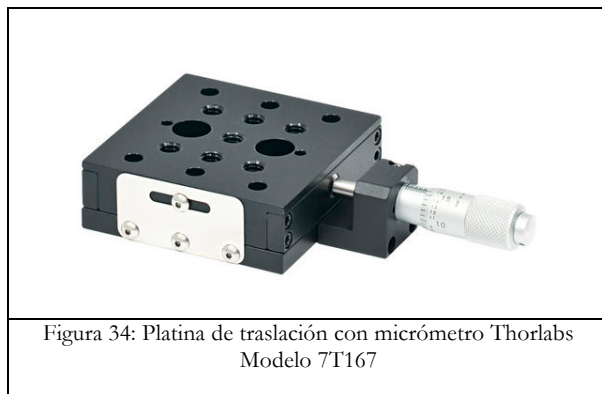
Para la formación de speckle se utilizó un láser He-Ne:



Figura 33: Láser He-Melles Griot modelo 05-LHP-691

Longitud de onda: 632.8 nm $\pm 1\%$
Diámetro del haz: 0.65 mm
Centrado del haz: ± 0.25 mm
Frecuencia de operación: 50-60 Hz
Voltaje de operación: 100 -115 Vac $\pm 10\%$

Para la medición de desplazamiento en los planos x,y se utilizó una platina de traslación:



Rango de medida: 0-100 mm
Resolución: 1 μm
Incertidumbre: $\pm 0.5 \mu\text{m}$
Capacidad de la carga: 16 kg
Peso: 0.6 kg

Figura 34: Platina de traslación con micrómetro Thorlabs Modelo 7T167

Como puede apreciarse cada uno de estos dispositivos contiene una incertidumbre, la cual hará su contribución directamente al resultado final, por lo que de manera subjetiva podría denotarse que entre más pequeña sea la resolución de cada uno de ellos mejor será la eficiencia de nuestro sistema de medición final.

Se emplearon espejos de primera reflexión, en donde el depósito del sustrato se realiza de manera directa sobre la superficie (cara expuesta a la luz), éste llega y se refleja, el sustrato no necesita ser transparente.

En los espejos de segunda reflexión la luz debe atravesar el vidrio o plástico, reflejarse y volver a travesar el cristal. Los espejos de uso doméstico más comunes son de segunda reflexión, ya que esto protege la frágil capa de reflexión de la corrosión, rasguños y otros daños. Sin embargo, en las superficies de precisión óptica normalmente se deposita el material reflectante en la superficie frontal del vidrio para evitar la introducción de aberraciones ópticas⁶.

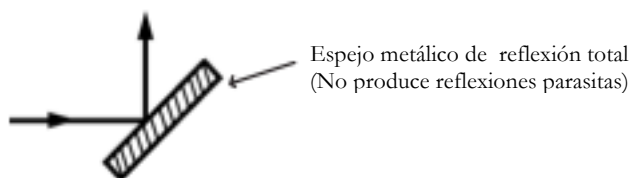


Figura 35: Espejo de primera reflexión.

Se emplearon espejos semitransparentes para dividir los haces. Cabe señalar que ambos (espejos y divisores de haz) también agregaran una incertidumbre, sin embargo por cuestiones prácticas las omitiremos debido a que están en función de su composición química, es decir, es difícil determinar con que grado de sustratos (aluminio, plata, etc.) fueron depositados.

⁶ Las aberraciones en sistemas ópticos (lentes, prismas, espejos, etc.) generalmente conllevan a una degradación de la imagen. Ocurren cuando la luz proveniente de un punto de un objeto no converge hacia (o no diverge desde) un solo punto luego de transmitirse a través del sistema.

4.2. Dispositivo experimental (fuera de plano).

Primeramente se desarrolló un sistema fuera de plano (previamente visto en el capítulo 2) para la medición de desplazamientos sobre el eje z , para el montaje experimental se empleo como fuente de luz monocromática un láser He-Ne con una potencia es de 5 mW y longitud de onda de 633 nm. Así mismo se utilizó como detector una cámara fotográfica (CCD) con las siguientes características:

Fabricante	Konica Minolta
Modelo	Dimage A2
Tamaño del CCD	2 / 3"
Apertura Máxima	$f / 2.8$ (Gran angular)
Número de píxeles	2568 (H) x 1928(V)
Tamaño del píxel	No especificado
Distancia focal	7 – 50 mm
Sensibilidad (ISO)	ISO 64,100,200,400 y 800
Resolución Máxima	3264x2448 píxeles

Tabla 1: Características de la cámara utilizada para la configuración fuera de plano.

Cabe mencionar que como superficies rugosas se utilizaron dos placas de aluminio las cuales fueron pulidas con un abrasivo (oxido de aluminio) conocido como alúmina cuyo tamaño de grano fue 220 μm , esto para garantizar que se produzca una reflexión difusa que nos permita captar correctamente el speckle generado por la fuente de luz láser. Éste trabajo se realizó en el taller de óptica del Instituto de Astronomía bajo la asesoría de expertos en pulido de superficies (véase Figura 36).



Figura 36: Pulido de placas con abrasivo de 220 μm

Se utilizó un objetivo de microscopio de 10X con la finalidad de ensanchar el haz de luz proveniente del láser, un divisor de haz (50/50) y un pinhole de $10\ \mu\text{m}$ el cual se colocó en el foco dicho objetivo (para lograrlo se utilizó un soporte el cual lleva un tornillo micrométrico que permite variar la distancia entre los dos elementos). La función del pinhole es únicamente realizar un filtrado espacial del haz, como se muestra en la siguiente Figura:

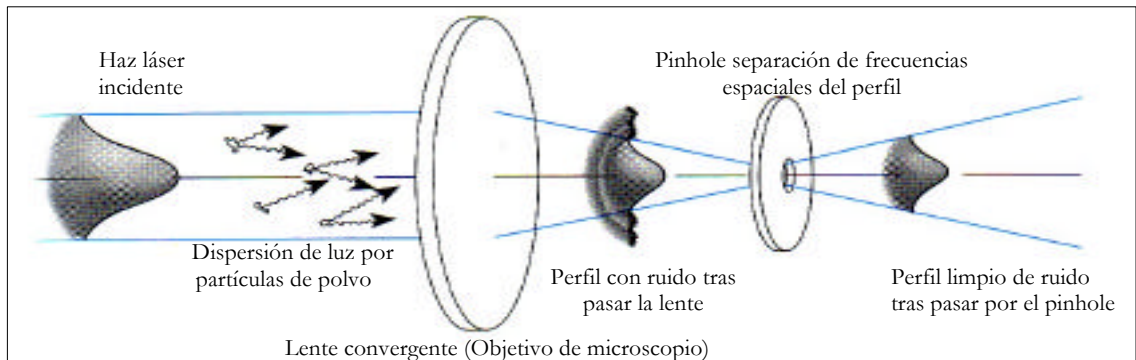


Figura 37: Funcionamiento de un pinhole

La lente convergente (objetivo de microscopio) cuya distancia focal es de 2 cm y apertura numérica de 0.25 realiza la separación de las altas y bajas frecuencias en su plano focal. Las altas frecuencias espaciales (responsables del "ruido") quedan más separadas del centro del haz y por consiguiente pueden ser eliminadas haciéndolas pasar por un pinhole. Tal y como se muestra en la siguiente Figura:

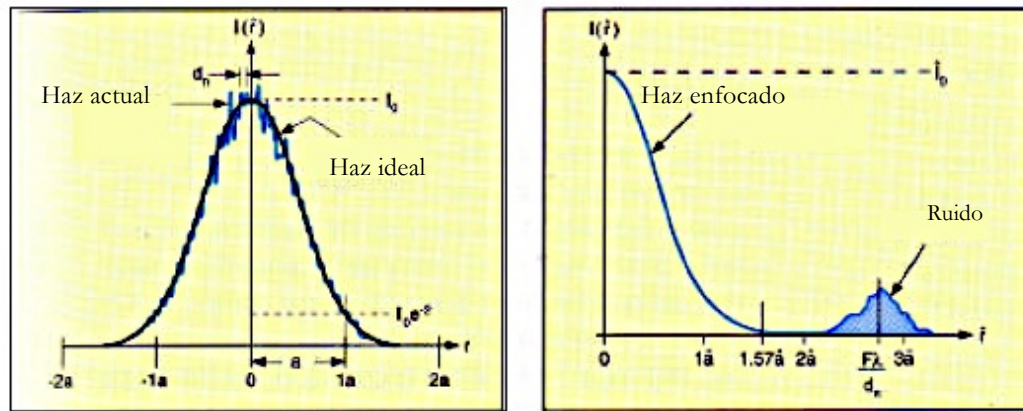


Figura 38: Filtro paso bajas (pinhole) para eliminar el ruido introducido en un haz por la dispersión de partículas.

4.2.1. Montaje

Tomando en cuenta todos estos componentes, se dió paso a la construcción del montaje experimental (integración y alineación de todo el sistema óptico), el cual se muestra en la Figura 39 y 40.

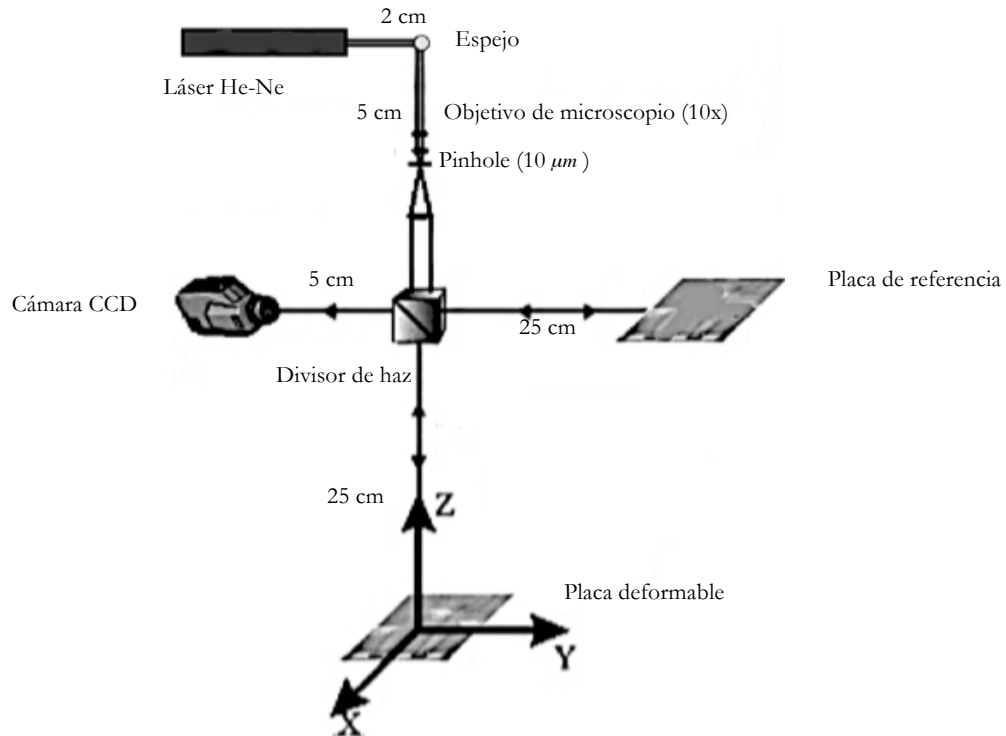


Figura 39: Montaje esquemático de la configuración fuera de plano realizada.

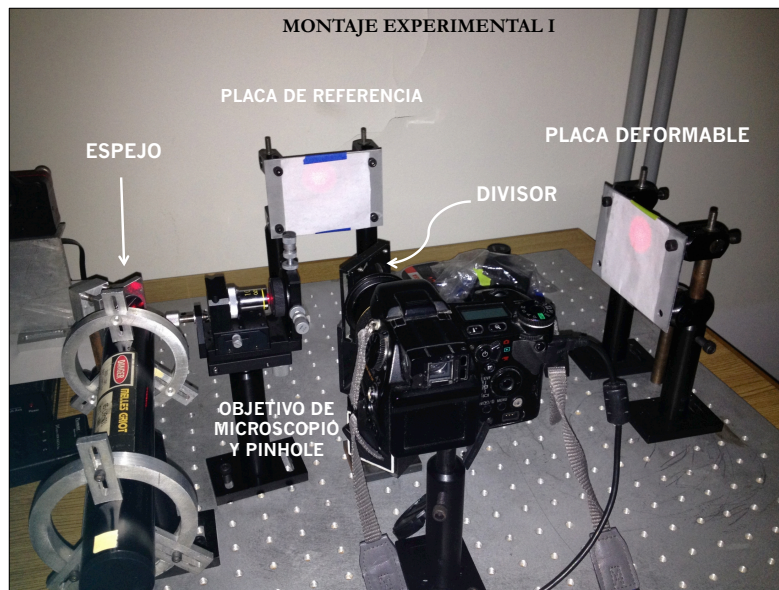


Figura 40: Montaje real de la configuración fuera de plano realizada.

Cabe hacer mucho énfasis de que en este experimento la alineación del sistema es probablemente la más tardada, así como la más crítica para conseguir buenos resultados. Su importancia se encuentra en que es necesario conseguir que el haz de luz vaya pasando de un elemento a otro paralelo al eje óptico del sistema (tiene que pasar por lentes, espejos, pinhole, etc). Todo esto es fundamental para que el sistema óptico realice su función y para minimizar las pérdidas de intensidad del haz de luz en su propagación por el sistema.

4.2.2. Puesta a punto de la técnica.

Mediante el uso de la cámara fotográfica Konica Minolta y su respectivo software de cómputo (véase Figura 41), se tomaron diversas fotografías con parámetros distintos para poder determinar si era factible o no la formación de franjas de interferencia, por lo que al final se logró conseguir un buen resultado con las siguientes características:

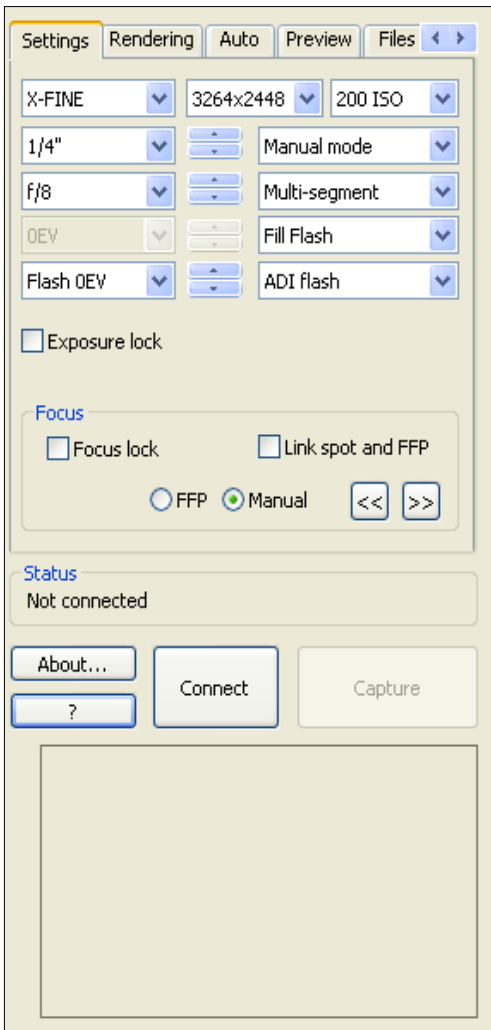


Figura 41: Parámetros de la cámara digital previos a la toma de imágenes.

Se puede observar claramente la utilización de un formato extra fino para la adquisición de imágenes con una resolución de 3264×2448 píxeles. Esto con la finalidad de que no hubiese una pérdida considerable de información en cuanto a la compresión de imágenes.

Con respecto a la velocidad de obturación, después de varias tomas se seleccionó una de 1/4 seg, esto con la finalidad de capturar la imagen con el menor movimiento posible, esta característica nos define la duración de la abertura mientras se toma la foto, como se muestra a continuación:

Velocidad de obturación	1/500	1/250	1/125	1/60	1/30
Duración de la abertura					
Valor de abertura-F	4	5,6	8	11	16
Abertura de diafragma					

Figura 42: Velocidad de obturación, número f

En cuanto al número f se seleccionó un valor de $f/8$, éste número nos define la cantidad de luz que pasará al sensor mediante la abertura del diafragma, un paso del diafragma nos dará la mitad o el doble de luz (véase Figura 42).

En cuanto a la profundidad de campo se refiere, con un número f pequeño tendremos una menor profundidad con respecto a un número f mayor.

El número de ISO es la sensibilidad a la luz que tiene el sensor digital de la cámara, cuanto mas alto sea éste número mayor será la sensibilidad a la luz y podremos tomar fotografías donde la luz sea muy baja. En nuestro caso se selecciono un ISO 200 dado a que el moteado proveniente del haz de luz láser era intenso y se podía ver de manera muy clara.

4.2.3. Tamaño del speckle

Tomando en cuenta que la magnificación viene dada por la relación entre el tamaño del sensor y el tamaño del objeto, tenemos que nuestro objeto fotografiado mide 4.5 cm (spot del haz de luz láser) y que nuestro sensor mide 1.7 cm. Entonces:

$$M = \frac{1.7 \text{ cm}}{4.5 \text{ cm}} = 0.377 \quad (4.1)$$

Haciendo uso de la ecuación 2.4 y tomando en cuenta que se utilizó un número f de $f/8$, un láser de 633[nm] y la magnificación del sistema imagen calculado anteriormente, tenemos que el tamaño del speckle es de:

$$S = 8.5 \text{ } \mu\text{m} \quad (4.2)$$

Por otra parte, considerando que el tamaño del píxel es la distancia desde el centro de un píxel al centro del siguiente medido en micrómetros. Éste se puede calcular mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Tamaño de píxel} = \frac{\text{Sensor de anchura en mm}}{\text{Ancho de resolución del sensor en píxeles}} \times 1000 \quad (4.3)$$

Konica-Minolta DiMAGE A2 tamaño de píxel	
<i>Ancho del sensor</i> = 8.80 mm	<i>Anchura Resolución del sensor</i> = 3264 píxeles

$$Tamaño\ de\ píxel = \frac{8.8\ mm}{3264\ píxeles} \times 1000 = 2.7\ \mu m \quad (4.4)$$

Como se puede observar el tamaño del píxel es mucho menor al tamaño del speckle con lo que se garantiza que se puede resolver de manera clara y nítida, en donde a cada píxel le corresponde aproximadamente una tercera parte del speckle.

4.2.4 Resultados Experimentales.

Se tomaron una serie de 2 fotografías una antes y otra después de la deformación inducida, estas guardaron en la memoria externa de la cámara y posteriormente se procesaron mediante Matlab (consultar código en el Apéndice), en donde se realizó la sustracción de imágenes para determinar de manera cuantitativa el desplazamiento generado. A continuación se muestran las imágenes obtenidas:

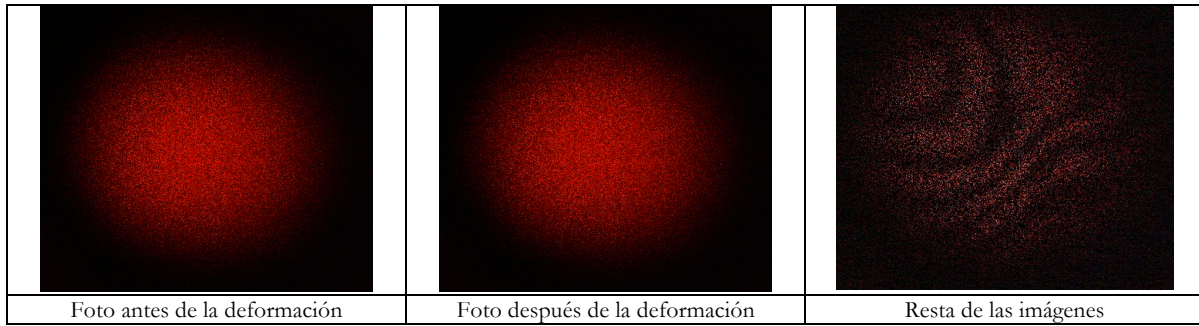


Figura 43: Franjas de interferencia en configuración fuera de plano con placas metálicas.

Se debe hacer notar que para llegar a estos resultados se hicieron varias pruebas con diferentes materiales y procesos, entre los que destacan: variaciones de temperatura mediante un cautín, vibraciones por medio de bocinas y pruebas con papel, esto con la finalidad de poder ajustar tanto los parámetros del speckle como los de la cámara.

Con respecto a los desplazamientos generados de acuerdo a la ecuación 3.1 y considerando que ángulo de iluminación es paralelo con respecto al movimiento en dirección del eje z ($\alpha = 0$) tenemos:

$$d = \frac{N \cdot \lambda}{2} \quad (4.5)$$

Número de franjas	Desplazamiento μm
1	0.316
2	0.633
3	0.949
4	1.266
5	1.582
6	1.899
7	2.215
8	2.532

Tabla 2: Resultados teóricos en configuración fuera de plano.

Con esta primera configuración se dió la pauta para poder medir desplazamientos fuera de eje (plano z) con un orden menor a $1 \mu\text{m}$, lo cual es satisfactorio para la validación de esta técnica, es por eso mismo que, a partir de esta se dará el paso más importante para el análisis de desplazamientos sobre los ejes (x,y) que son los que toman relevancia en nuestro sistema de medición interferométrico.

4.3. Dispositivo experimental (en plano).

Para esta segunda configuración en plano, se utilizó una videocámara con las siguientes características:

Fabricante	Watec
Modelo	902H
Tamaño del CCD	$1/2''$
Dimensiones:	35.5(W)x36(H)x58(L) mm
Número de píxeles	$811(H) \times 508(V)$
Tamaño del píxel	$8.4 \mu\text{m}$
Peso	90 gr

Tabla 3: Características de la cámara utilizada en configuración en plano.

De éste mismo modo se utilizó una capturadora de video (MyGica U5072 Hybrid) para poder realizar la visualización en tiempo real de las variaciones y/o movimientos inducidos en la placa bajo estudio.

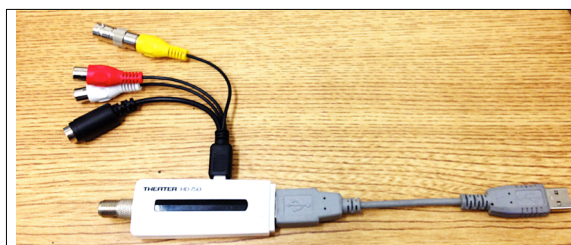
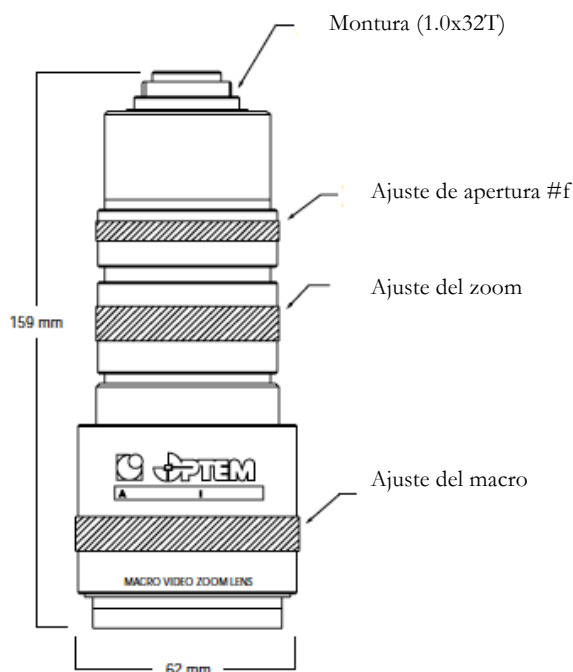


Figura 44: Capturadora de video para la adquisición de imágenes.

También se incorporaron dos lentes convergentes en lugar de objetivos de microscopio cuyas distancias focales son de 4mm, así mismo se agrego un espejo adicional que se utilizo para desviar el haz proveniente del divisor. El láser y los instrumentos de medición empleados para esta configuración fueron los mismos que los utilizados en la configuración fuera de plano.

En esta configuración se utilizó un macro-zoom óptico y una apertura del número f (diafragma) independientes para poder ajustar de manera adecuada la imagen, esto debido a que la cámara de video no cuenta con estas características ni tampoco con un software específico para su utilización (véase Figura 45).



Fabricante	Optem
Modelo	34-11-10
Distancia de trabajo Macro	5.5-11"
Distancia de trabajo Zoom	11"- ∞
Longitud focal	18-108 mm
Formato de cámara	1/2"
Número f	2.5 - Cerrado

Tabla 4: Características del macro-zoom utilizado en configuración en plano.

Figura 45: Macro y Zoom utilizados para la configuración en plano

De éste mismo modo para compensar los valores de intensidad ISO se optó por implementar dentro del programa de visualización de franjas en tiempo real (detallado más adelante) funciones de saturación, brillo y contraste.

4.3.1. Montaje

Si deseamos tener las tres componentes(x,y,z) para medir deformaciones, es necesario contar con dos haces de iluminación y las dos configuraciones previamente descritas (fuera y dentro del plano), sin embargo por cuestiones de simplicidad se optó por medir solo desplazamientos en los ejes (x,y), dado que al tener un desplazamiento en el eje z solo se provocaría un desenfoque en nuestro sistema óptico, así de esta manera se configuró el montaje experimental mostrado en las Figuras 46 y 47.

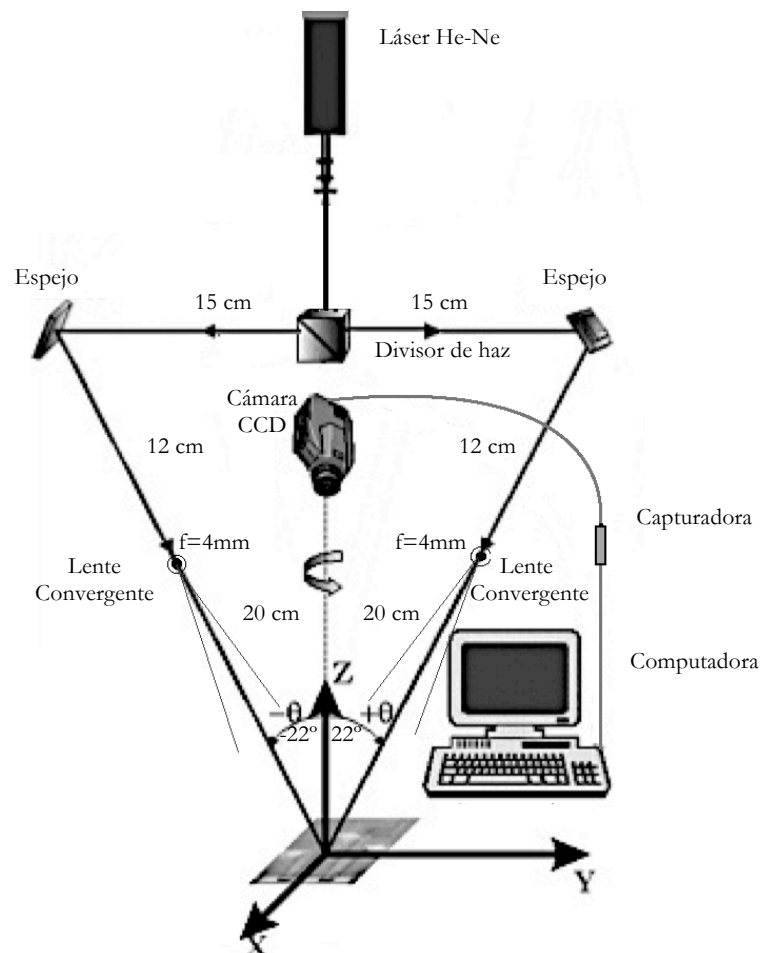


Figura 46: Montaje esquemático para la configuración en plano realizada.

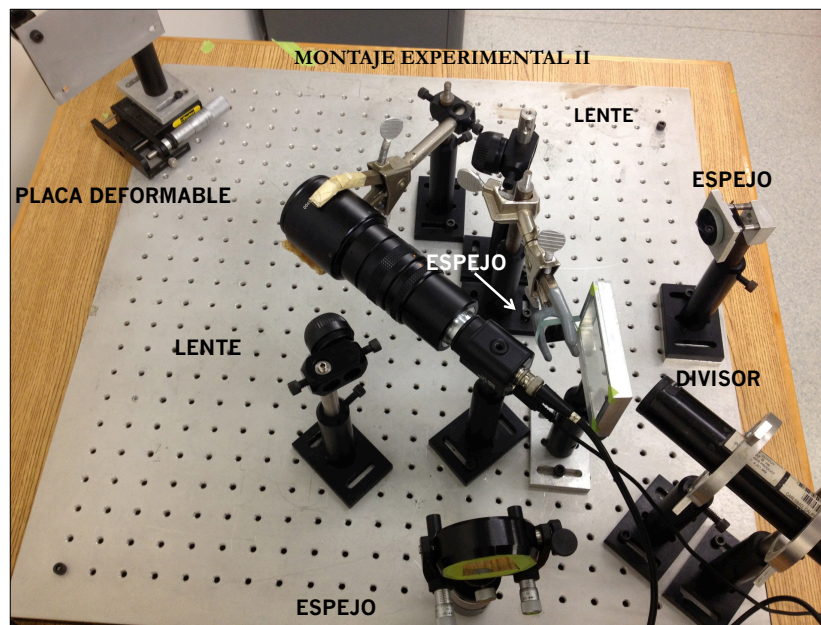


Figura 47: Montaje real de la configuración en plano realizado.

4.3.2. Puesta a punto de la técnica.

Una vez montado el experimento se realizó el procesamiento de imágenes mediante Matlab, en el cual una imagen a escala de grises es representada por medio de una matriz bidimensional de $m \times n$ elementos en donde n representa el número de píxeles de ancho y m el número de píxeles de largo (véase Figura 48).

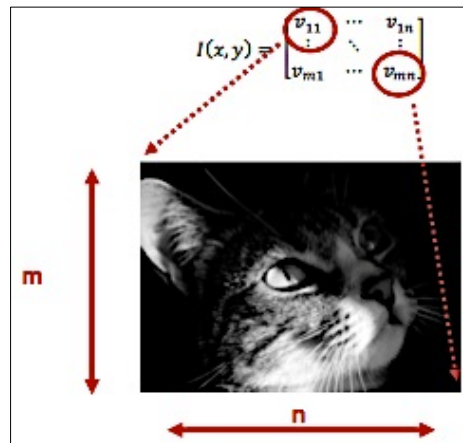


Figura 48: Representación de una imagen a escala de grises en Matlab.

El elemento v_{11} corresponde al elemento de la esquina superior izquierda, donde cada elemento de la matriz de la imagen tiene un valor de 0 (negro) a 255 (blanco).

Por otro lado una imagen de color RGB (la más usada para la visión computacional, además de ser para Matlab la opción por defecto) es representada por una matriz tridimensional $m \times n \times p$, donde m y n tienen el mismo significado para el caso de las imágenes de escala de grises mientras que p representa el plano, es decir, para RGB debe ser uno para el rojo, dos para el verde y tres para el azul (véase Figura 49).

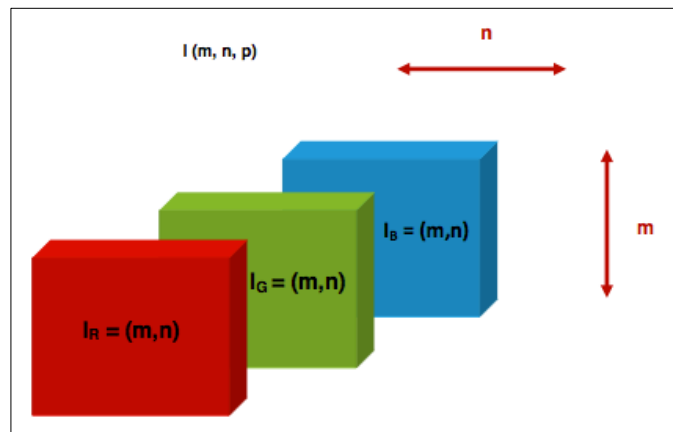


Figura 49: Representación de una imagen RGB en Matlab

En cuanto al Toolbox de Adquisición de Imágenes se define como una colección de funciones que sirven para obtener imágenes de diversos dispositivos (USB, cámaras web) para visualizar videos en vivo, para la adquisición de imágenes mediante triggers, para importar datos hacia el entorno de trabajo y a su vez permite efectuar la aplicación en tiempo real.

El Toolbox de Procesamiento de Imágenes proporciona a Matlab un conjunto de funciones que amplía las capacidades del producto para realizar desarrollo de aplicaciones y de nuevos algoritmos en el campo del proceso y análisis de imágenes.

Este Toolbox cuenta con las siguientes funciones:

- Diseño de filtros.
- Funciones para la extracción de bordes.
- Imágenes binarias y segmentación por umbral.
- Selección de objetos.
- Funciones para la conversión de imágenes y formatos de color.
- Análisis y estadística de imágenes.
- Detección de video.

En nuestro caso específico se efectuó la adquisición de video en tiempo real de las deformaciones inducidas a una placa a partir de una videocámara de baja resolución (Watec 902H), se usó éste tipo de cámara porque es de fácil acceso en cuanto a costo, además de que se puede sincronizar perfectamente con el software Matlab.

A continuación se muestran los comandos para identificar las características principales que constituyen a la cámara y poder usarla a su máxima capacidad:

Imaqhwinfo % despliega la información sobre el hardware disponible, es decir, muestra los controladores que contiene la cámara, la versión de Matlab, el Toolbox de la adquisición de imagen e igualmente su versión. En éste caso, se observa un adaptador 'winvideo' con el que se está trabajando por la compatibilidad con el software.

ans =

```
InstalledAdaptors: {'coreco' 'winvideo'}  
MATLABVersion: '7.6 (R2008a)'  
ToolboxName: 'Image Acquisition Toolbox'  
ToolboxVersion: '3.1 (R2008a)'
```

Imaqhwinfo('winvideo') % muestra la información detalladamente acerca del controlador que se está usando.

ans =

AdaptorDllName: [1x88 char]
AdaptorDllVersion: '3.1 (R2011a)'
AdaptorName: 'winvideo'
DeviceIDs: {[1]}
DeviceInfo: [1x1 struct]

imaqhwinfo('winvideo',1) % expone las características propias del dispositivo utilizando el identificador número 1, por ejemplo el formato por defecto, el nombre del dispositivo, el objeto para la toma de imágenes, así como los distintos formatos con los que cuenta la cámara.

ans =

DefaultFormat: 'UYVY_720x240'
DeviceFileSupported: 0
DeviceName: 'AVStream Analog Capture'
DeviceID: 1
ObjectConstructor: 'videoinput('winvideo', 1)'
SupportedFormats: {'1x4 cell'}

ans.SupportedFormats % especifica los diferentes formatos del dispositivo

ans =

Columns 1 through 3

'UYVY_720X240' 'UYVY_720X288' 'UYVY_720X480'

Una vez obtenida la información del dispositivo se procede a realizar un programa en Matlab con la máxima resolución posible (720x480 píxeles), el cual nos permitirá tomar una primera imagen antes de la deformación, para posteriormente restarla a las imágenes subsecuentes en tiempo real con la finalidad de observar las franjas de interferencia provocadas por los desplazamientos generados. Dicho código se encuentra detallado en el Apéndice de éste trabajo.

4.3.3. Tamaño del speckle

Al igual que la configuración anterior, se calculó el valor de la magnificación pero ahora con respecto a un sensor de 1.27 cm y un objeto de 4.5 cm, con lo que tenemos:

$$M = \frac{1.27cm}{4.5cm} = 0.282 \quad (4.6)$$

Haciendo uso de la ecuación 2.4 y tomando en cuenta que para esta configuración también se utilizó un número f de f/8, un láser de 633 nm y la magnificación del sistema imagen calculado anteriormente, tenemos que el tamaño del speckle es de:

$$S = 7.9 \text{ } \mu\text{m} \quad (4.7)$$

Calculando el tamaño del píxel para esta cámara, tenemos:

$$Tamaño \text{ de píxel} = \frac{\text{Sensor de anchura en mm}}{\text{Ancho de resolución del sensor en píxeles}} \times 1000 \quad (4.8)$$

Watec 902H tamaño de píxel	
<i>Ancho del sensor</i> = 6.80 mm	<i>Anchura Resolución del sensor</i> = 811 píxeles

$$Tamaño \text{ de píxel} = \frac{6.80 \text{ mm}}{811 \text{ píxeles}} \times 1000 = 8.4 \text{ } \mu\text{m} \quad (4.9)$$

Cabe señalar que el tamaño del píxel (8.4 μm) sobrepasa el tamaño del speckle (7.9 μm), por lo que la videocámara se encontrará trabajando en el límite, pudiendo en ocasiones no cumplir con el número efectivo de píxeles⁷ requeridos para la resolución de la imagen y produciendo que la relación de tamaños (1:1) difiera considerablemente.

⁷ Se refiere a la cantidad de píxeles usados para crear la imagen. El número efectivo de píxeles es usualmente menor que el número de píxeles que el CCD es capaz de capturar.

4.3.4. Resultados Experimentales.

De acuerdo al número de franjas generado (en el plano x), utilizamos la siguiente expresión (ecuación 3.2) para determinar los desplazamientos en dirección del eje de movimiento, la cual se muestra a continuación:

$$d = \frac{N\lambda}{2\sin(\alpha/2)} \quad (4.10)$$

Del diagrama del montaje experimental (Figura 43) se observa que el ángulo entre el plano de observación y el eje de movimiento es de:

$$\alpha / 2 = 22^\circ$$

Haciendo los cálculos correspondientes obtenemos:

Número de franjas	Desplazamiento μm
0	0
1	0.84
2	1.68
3	2.53
4	3.37
5	4.22
6	5.06

Tabla 5: Resultados teóricos en configuración en plano (para el eje x).

Se puede observar en los resultados anteriores (teóricos) que ésta configuración es factible para medir desplazamientos menores a 1 μm , de tal manera que se optó por verificar la técnica de manera experimental, para ello se colocó una platina de traslación micrométrica previamente calibrada en cero directamente sobre una placa y se fué midiendo la distancia sobre el eje x conforme el número de franjas iba incrementando. Todo éste proceso se llevó a cabo mediante un programa previamente descrito, el cual se encarga de visualizar las franjas de interferencia en el monitor de una computadora.

Así de esta manera se realizó una serie de cinco mediciones con el propósito de representar el desplazamiento con respecto al número de franjas. A continuación se muestran los datos obtenidos:

# Franjas	Desplazamiento μm	Desplazamiento μm	Desplazamiento μm	Desplazamiento μm	Desplazamiento μm
0	0	0	0	0	0
1	0.8	0.6	0.5	0.7	0.8
2	1.5	1.9	1.7	1.6	1.5
3	2.8	2.6	2.7	2.9	2.8
4	3.5	3.4	3.7	3.9	3.7
5	4.4	4.5	4.3	4.3	4.7
6	5.3	5.4	5.5	5.4	5.3

Tabla 6: Resultados experimentales en configuración en plano (para el eje x).

Para obtener un valor más certero se propuso hacer un promedio de los resultados obtenidos, esto con la finalidad de que el resultado sea lo más homogéneo posible. Así mismo se obtuvo la desviación estándar de cada uno de los datos para determinar la fluctuación de estos respecto a su punto central.

# Franjas	Desplazamiento promedio μm	Desviación estándar μm
0	0	0
1	0.7	0.13
2	1.7	0.16
3	2.8	0.11
4	3.7	0.19
5	4.5	0.16
6	5.4	0.08

Tabla 7: Promedio y desviación estándar de los resultados experimentales en configuración en plano (para el eje x).

En la tabla 7 se puede observar que la desviación estándar de los datos es muy pequeña con respecto a su promedio, con lo que se concluye que existe una tendencia a variar por debajo o por encima del desplazamiento de cada una de las franjas experimentadas alrededor de $0.1 \mu\text{m}$, con esto se garantiza que no exista una variación mayor a esta en los datos.

A continuación se grafican los valores pertinentes al número de franjas y el desplazamiento promedio:

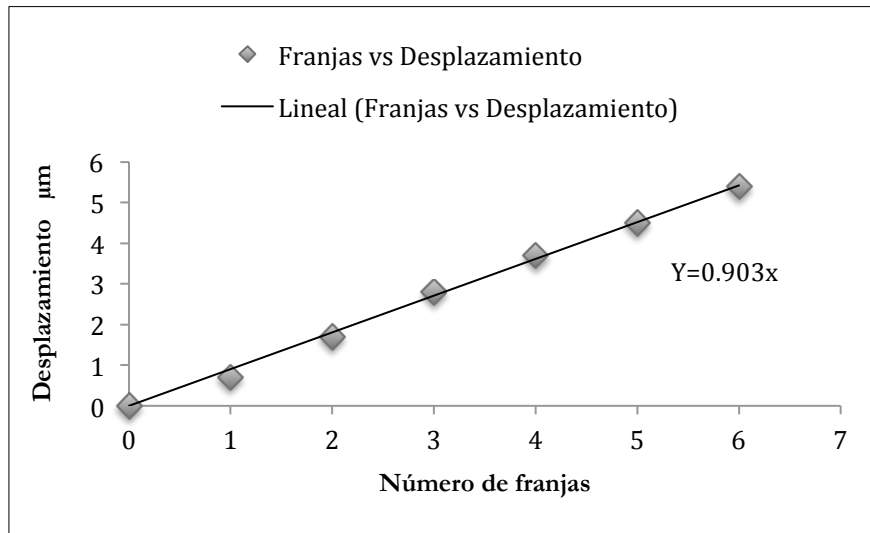


Figura 50: Gráfica de la ecuación del sistema para la configuración en plano.

Sobre esta misma gráfica se hizo un ajuste lineal (recta en negro) para poder obtener la ecuación representativa del desplazamiento con respecto al número de franjas experimentado, el cual viene dado por la siguiente expresión:

$$Y = 0.903 \mu\text{m} \cdot x \quad (4.11)$$

Cabe señalar que la contabilización de franjas de interferencia se realizó de manera subjetiva, es decir, que cada diferencia de tonalidad negro-blanco representa una franja, es conveniente recalcar que sólo se utilizaron números enteros para dicha contabilización.

Como se puede apreciar en las tablas 5 y 7 no existe un factor de amplificación, sin embargo en el caso donde se requiera ensanchar el haz mediante una lente, se tendrían que hacer las siguientes consideraciones:

La apertura numérica de un sistema óptico caracteriza el rango de ángulos para los cuales el sistema acepta luz y viene definido por:

$$AN = n \sin(\theta) \quad (4.12)$$

Donde:

n = Índice de refracción en el medio.
 θ = Mitad del ángulo del cono de luz que puede entrar o salir de la lente.

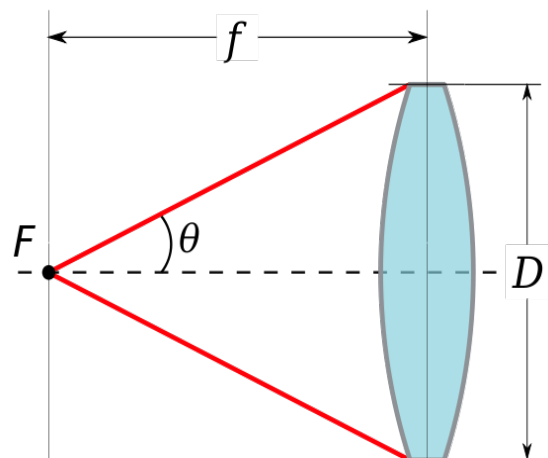


Figura 51: Representación gráfica del número f.

Proyectando el ángulo θ tenemos:

$$AN = n \sin \left[\arctan \left(\frac{D/2}{f} \right) \right] \rightarrow AN = n \sin \left(\frac{D/2}{f} \right) \rightarrow AN = n \sin \left(\frac{D}{2f} \right) \quad (4.13)$$

Asumiendo $n = 1$ y $\#F = f / D$

$$AN = \sin \left(\frac{1}{2 \cdot \#F} \right) \quad (4.14)$$

Por ejemplo tomemos en cuenta una lente divergente de $AN = 0.25$

$$\#F = \sin \left(\frac{1}{2 \cdot AN} \right) \rightarrow \#F = \sin \left(\frac{1}{2 \cdot 0.25} \right) = 2 \quad (4.15)$$

Y considerando que el diámetro de la lente es de 10mm, la distancia focal para formar la imagen es:

$$f = (\#F)(D) = 2(10 \text{ mm}) = 20 \text{ mm} = 2 \text{ cm} \quad (4.16)$$

El parámetro característico de una lente es su distancia focal f , que relaciona la distancia s del objeto con la de su imagen s' de acuerdo con la ecuación:

$$\frac{1}{f'} = \frac{1}{s'} + \frac{1}{s} \rightarrow \frac{1}{2 \text{ cm}} = \frac{1}{20 \text{ cm}} + \frac{1}{s} \rightarrow s = 2.2 \text{ cm} \quad (4.17)$$

$$Aumento = \frac{s'}{s} = \frac{20}{2.2} = 9 \quad (4.18)$$

$$\text{Ancho spot} \rightarrow (1 \text{ mm})(9) = 9 \text{ mm} \quad (4.19)$$

4.3.5. Análisis de medidas de dispersión estadística.

El promedio ó media de una variable aleatoria es de especial importancia, pues describe el lugar donde se centra la distribución de probabilidad.

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad (4.20)$$

Sin embargo la media no da una descripción adecuada de la forma de la distribución, para ello necesitamos caracterizar la variabilidad de la distribución mediante la varianza.

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1} \quad (4.21)$$

La desviación estándar es una medida de la dispersión o variación de los valores de la variable aleatoria alrededor la media. Si los valores tienden a concentrarse alrededor de la media la desviación es pequeña; en tanto que si los valores tienden a distribuirse lejos de la media, la desviación es grande.

$$S = \sqrt{S^2} \quad (4.22)$$

CAPÍTULO

V.- Estudio cuantitativo de las fuerzas que actúan en los sistemas optomecánicos.

Con la puesta en marcha de la configuración en plano, se analizaron las deformaciones en una placa metálica a partir de una fuerza externa aplicada en una de las esquinas, esto con la finalidad de poder cuantificar el esfuerzo máximo y mínimo en los ejes de movimiento (x,y) y así poder determinar de manera cuantitativa cuan factible es la utilización de esta técnica para medir deformaciones en sistemas de sujeción ópticos.

5.1. Análisis de deformaciones en placas metálicas.

Para la primera etapa se hizo incidir una fuerza externa la esquina superior izquierda de la muestra bajo estudio (placa de aluminio) la cual varió desde 0 hasta 0.273 N, posteriormente mediante la técnica en plano se observaron las cuatro esquinas de la placa con la finalidad de obtener franjas de interferencia proporcionales al movimiento inducido (véase figura 52). En la imagen se observa que los haces están colocados en función del eje de movimiento (eje x).

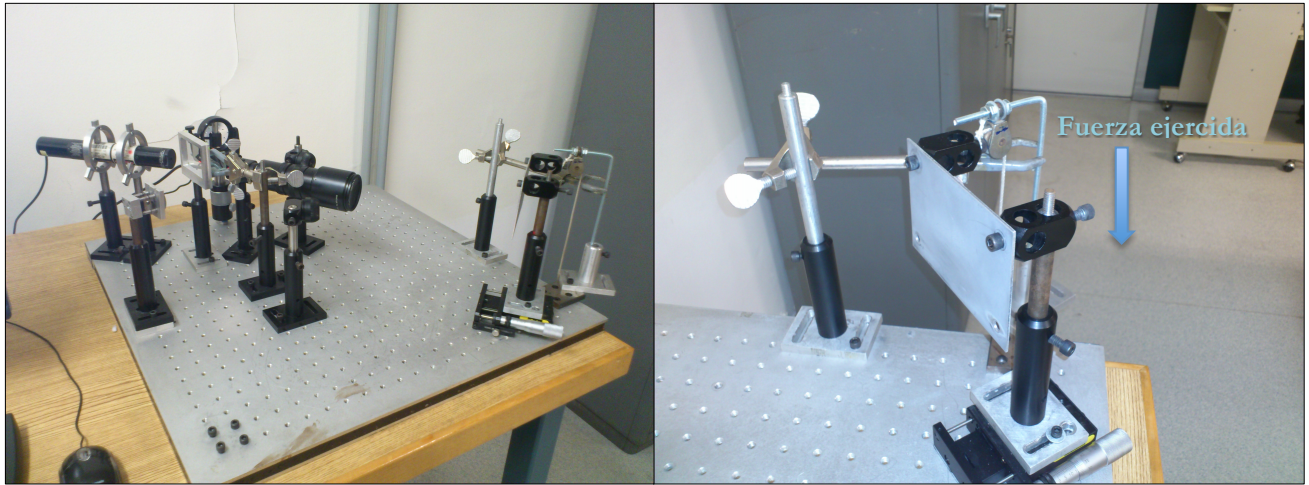


Figura 52: Medición de desplazamientos en placas metálicas sobre el eje x.

Para la segunda etapa se realizó el mismo análisis, sin embargo se cambio la orientación de los haces, con la finalidad de poder caracterizar el movimiento con respecto al eje y, pudiendo de esta manera cuantificar de manera precisa donde encuentra esfuerzo máximo y mínimo (véase Figura 53).

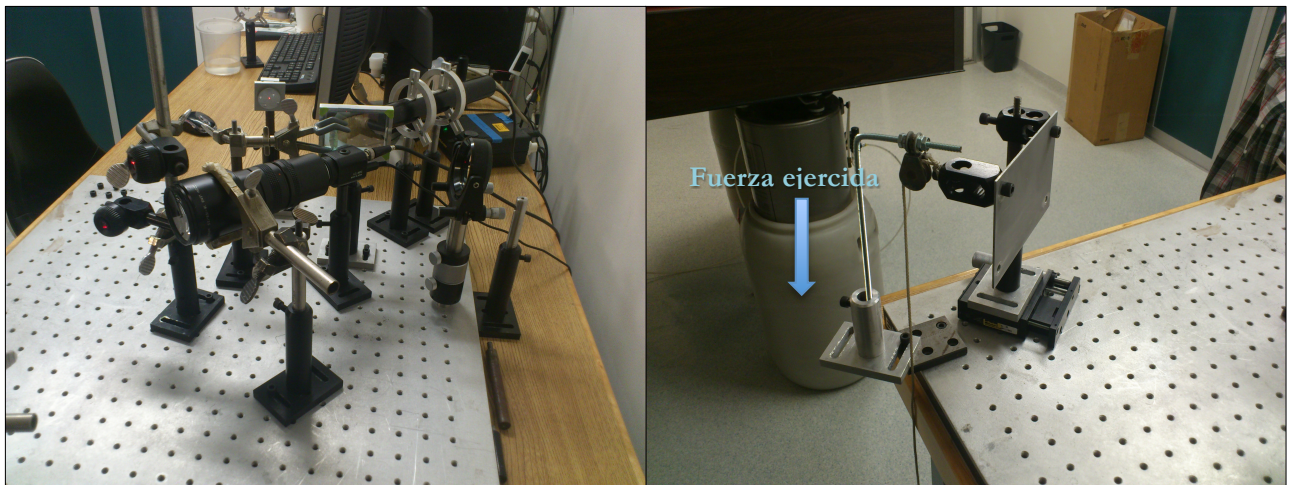


Figura 53: Medición de desplazamientos en placas metálicas sobre el eje y.

5.2. Resultados.

Antes de comenzar a mostrar los resultados obtenidos, se hará énfasis en la nomenclatura utilizada de aquí en adelante para interpretar de manera adecuada las tablas de resultados. Para ello tomemos en cuenta la Figura 54, en donde se muestran las esquinas que fueron estudiadas bajo una fuerza externa y su respectiva abreviatura.

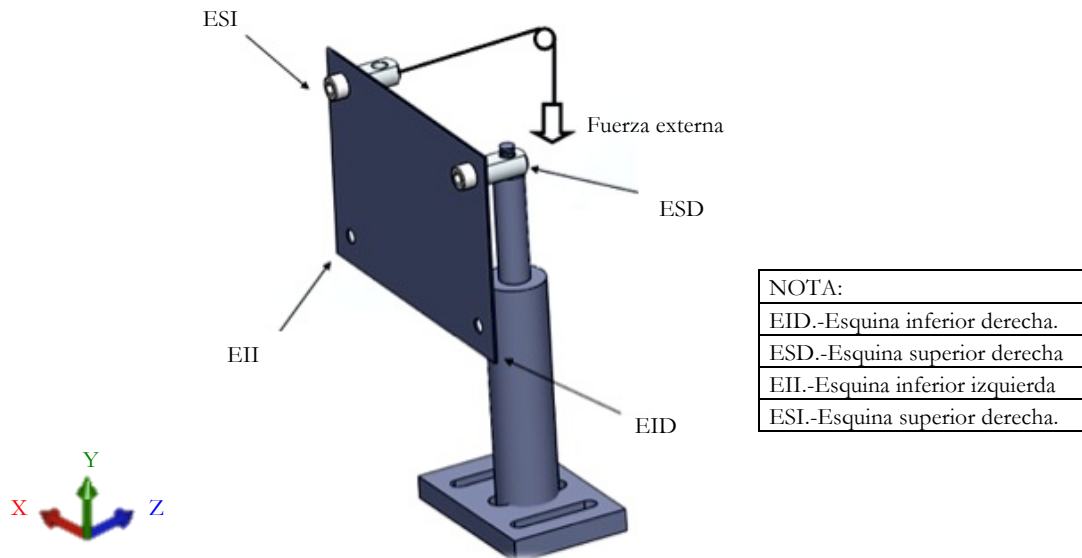


Figura 54: Nomenclatura para el montaje experimental en plano realizado.

Para la primera etapa (desplazamientos en el eje x) se hizo incidir una fuerza externa en la esquina superior izquierda de la placa mediante una polea, la cual se encargó de transmitir la fuerza en dirección perpendicular al eje de movimiento y así poder cuantificar la deformación correspondiente de acuerdo a la carga inducida. La magnitud de la fuerza fue variando proporcionalmente de 0 a 0.273 N.

Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 8, de izquierda a derecha se denotan cada una de las esquinas analizadas y de arriba hacia abajo se muestran los valores de fuerza aplicados y sus respectivas franjas de interferencia.

Masa Kg	Fuerza N	# Franjas ESI	#Franjas ESD	#Franjas EII	#Franjas EID
0	0	0	0	0	0
0.002	0.019	0	0	0	0
0.004	0.039	1	0	0	0
0.006	0.058	1	0	0	0
0.008	0.078	2	0	0	0
0.010	0.097	2	0	1	0
0.012	0.117	3	0	1	1
0.014	0.136	3	0	1	1
0.016	0.156	4	0	1	1
0.018	0.176	4	0	2	1
0.020	0.195	5	0	2	1
0.022	0.215	5	0	2	2
0.024	0.234	6	0	2	2
0.026	0.254	6	0	3	2
0.028	0.273	7	0	3	2

Tabla 8: Resultados experimentales de deformaciones en placas metálicas para el eje x.

A continuación se muestran los desplazamientos equivalentes de acuerdo a las franjas de interferencia obtenidas para cada una de las esquinas:

#Franjas	Desplazamiento μm
0	0
1	0.844
2	1.689
3	2.534
4	3.379
5	4.224
6	5.069
7	5.914

Tabla 9: Tabla de equivalencias entre franjas y desplazamientos para el eje x.

Se puede observar como aumenta el número de franjas conforme a la fuerza inducida, así mismo se aprecia que en la esquina superior izquierda se tiene el máximo esfuerzo generado al tener un desplazamiento total de siete franjas de interferencia correspondientes a $5.914\text{ }\mu\text{m}$. A continuación se presentan las franjas relativas al desplazamiento.

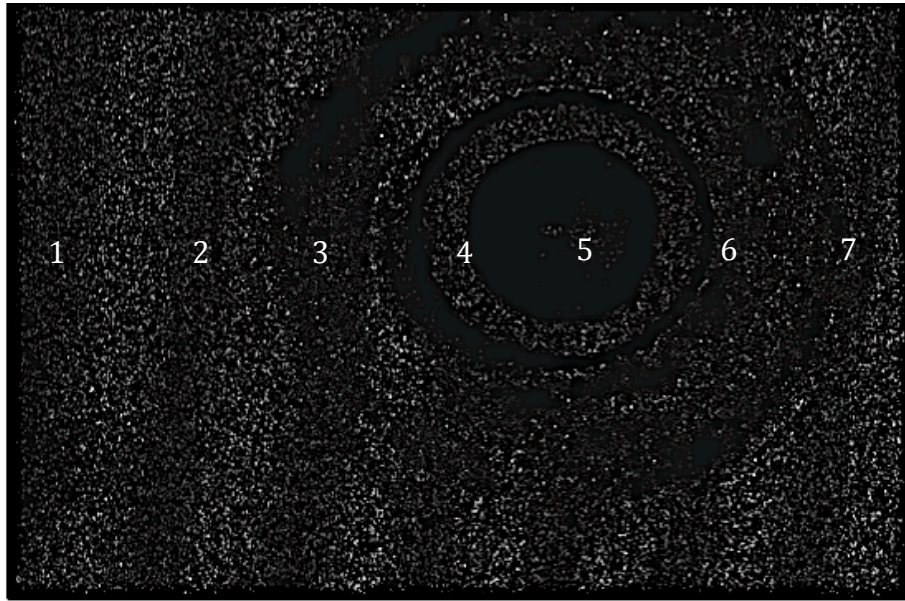


Figura 55: Franjas de interferencia obtenidas en la esquina superior izquierda para el eje x.

También se observa que en la esquina superior derecha no existe una deformación considerable debido a que nuestra pieza se encontraba sujeta a una base fija y atornillada a una mesa óptica la cuál impedía el movimiento de la placa en esa dirección, por tal motivo en la tabla podemos observar que el número de franjas es cero y permanece constante para todos los valores de fuerza inducidos. A continuación se presentan las franjas relativas al desplazamiento.

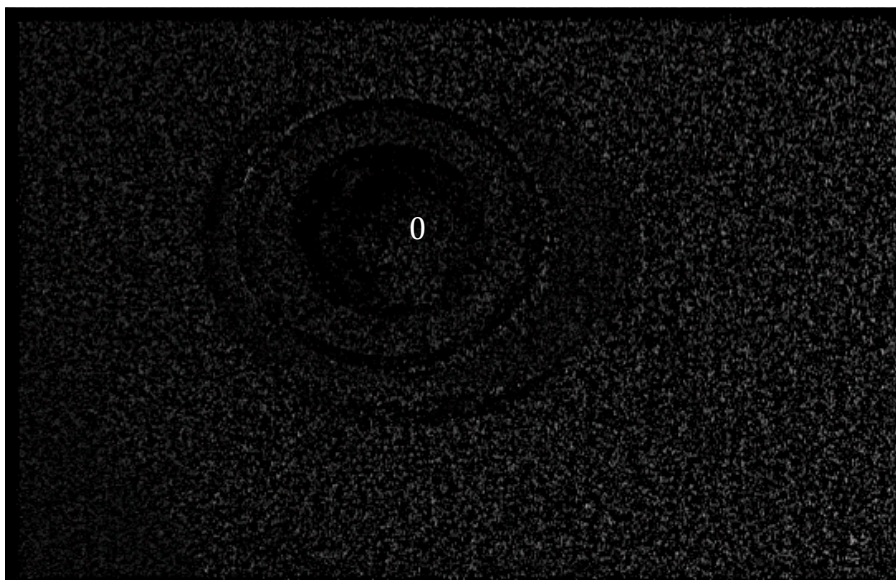


Figura 56: Franjas de interferencia obtenidas en la esquina superior derecha para el eje x.

Para la esquina inferior izquierda se observa que el desplazamiento máximo sufrido por la placa fue de tres franjas de interferencia proporcionales a $2.534\ \mu\text{m}$, esto debido a que la deformación se concentra principalmente en el punto de acción de la fuerza (esquina superior izquierda). A continuación se presentan las franjas relativas al desplazamiento.



Figura 57: Franjas de interferencia obtenidas en la esquina inferior izquierda para el eje x

Por último, se obtuvieron dos franjas de interferencia para la esquina inferior derecha equivalentes a $1.689\ \mu\text{m}$. Cabe mencionar que aquí el desplazamiento fue mínimo dado que éste se encuentra demasiado alejado de la fuente de fuerza aplicada. A continuación se presentan las franjas relativas al desplazamiento.

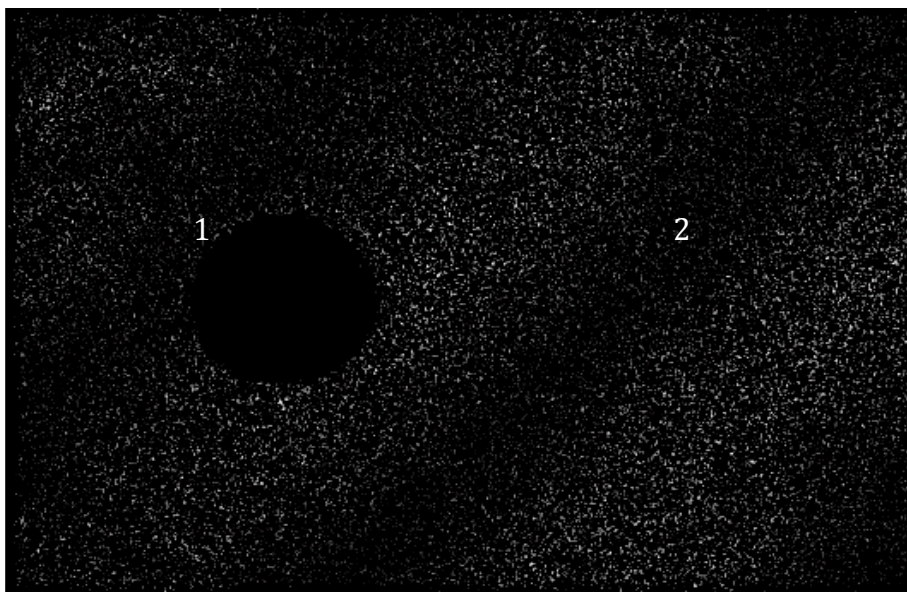


Figura 58: Franjas de interferencia obtenidas en la esquina inferior derecha para el eje x.

Para la segunda etapa (desplazamientos en el eje y) se obtuvieron los resultados mostrados en la tabla 10.

Masa Kg	Fuerza N	# Franjas ESI	#Franjas ESD	#Franjas EII	#Franjas EID
0	0	0	0	0	0
0.002	0.019	1	0	1	1
0.004	0.039	2	0	1	2
0.006	0.058	3	0	1	3
0.008	0.078	4	0	1	3
0.010	0.097	5	0	1	4
0.012	0.117	6	0	1	4
0.014	0.136	7	0	1	5
0.016	0.156	8	0	1	5
0.018	0.176	9	0	1	6
0.020	0.195	10	0	1	7
0.022	0.215	11	0	1	8
0.024	0.234	11	0	1	9
0.026	0.254	12	0	1	10
0.028	0.273	12	0	1	11

Tabla 10: Resultados experimentales de deformaciones en placas metálicas para el eje y.

#Franjas	Desplazamiento μm
0	0
1	0.844
2	1.689
3	2.534
4	3.379
5	4.224
6	5.069
7	5.914
8	6.759
9	7.603
10	8.448
11	9.293
12	10.13
13	10.98

Tabla 11: Tabla de equivalencias entre franjas y desplazamientos para el eje y.

Se observa que al igual que en el caso anterior, el desplazamiento más grande se registra en la esquina superior izquierda con un valor de trece franjas de interferencia equivalentes a $10.98 \mu\text{m}$. A continuación se presentan las franjas relativas al desplazamiento.

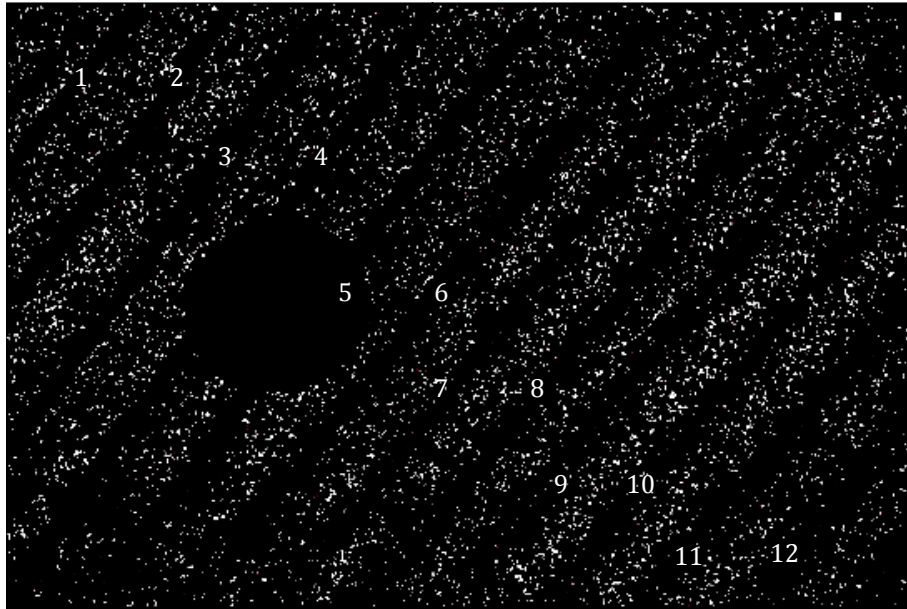


Figura 59: Franjas de interferencia obtenidas en la esquina superior izquierda para el eje y.

En cuanto a la esquina superior derecha, no se observa un desplazamiento, esto debido a que la fuerza aplicada es muy pequeña como para deformar el poste óptico de sujeción y a la mesa óptica a la que se encuentra anclado. A continuación se presentan las franjas relativas al desplazamiento.

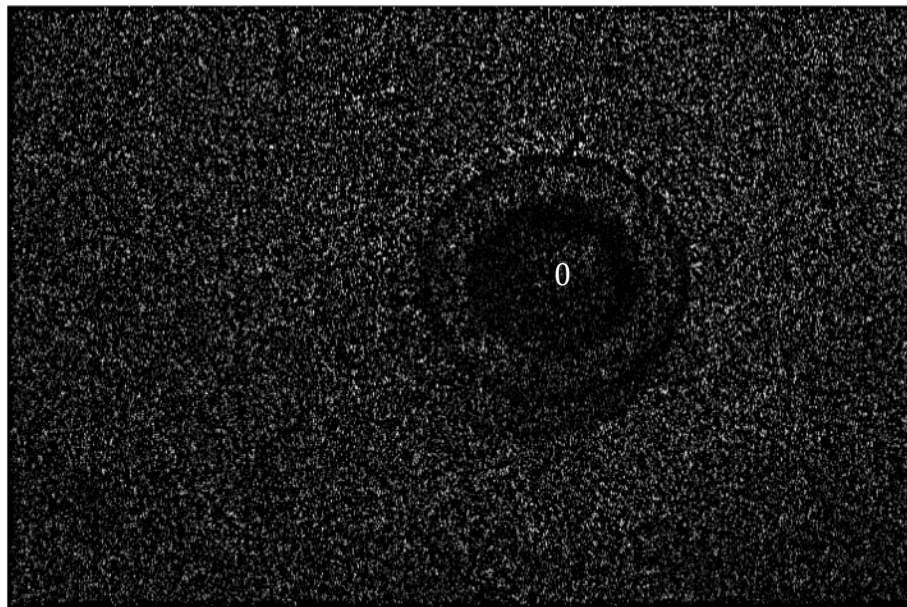


Figura 60: Franjas de interferencia obtenidas en la esquina superior derecha para el eje y.

En la esquina inferior derecha hubo un desplazamiento de once franjas de interferencia equivalentes a $9.293 \mu\text{m}$, esto debido a que existe una fuerza en sentido contrario que se opone al movimiento de la fuerza aplicada. A continuación se presentan las franjas relativas al desplazamiento.

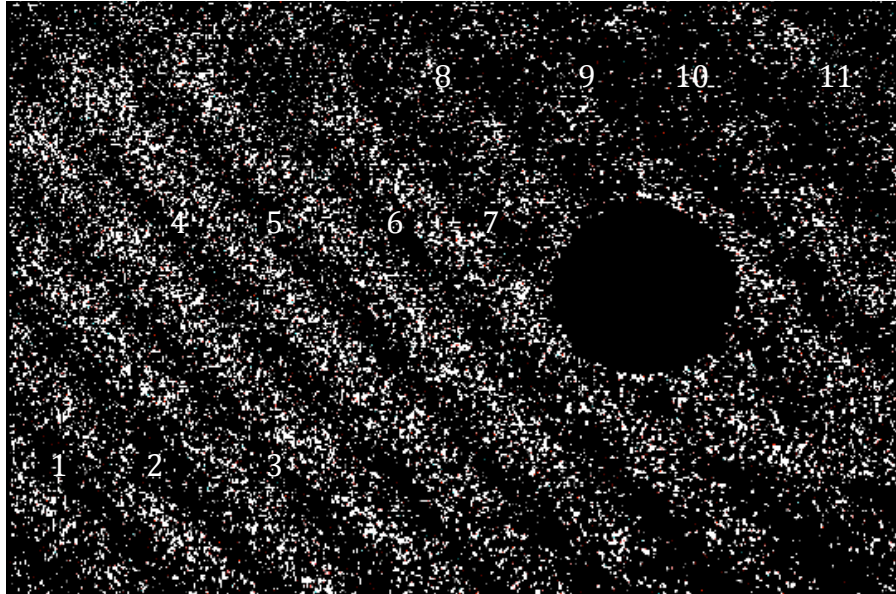


Figura 61: Franjas de interferencia obtenidas en la esquina inferior izquierda para el eje y.

Por último, con respecto a la esquina inferior izquierda, se observa que no hay un desplazamiento considerable dado que la fuerza ejercida no es capaz de llegar a este punto y ejercer un desplazamiento, por lo que se tiene una franja de interferencia equivalente a $0.844 \mu\text{m}$. A continuación se presentan las franjas relativas al desplazamiento.

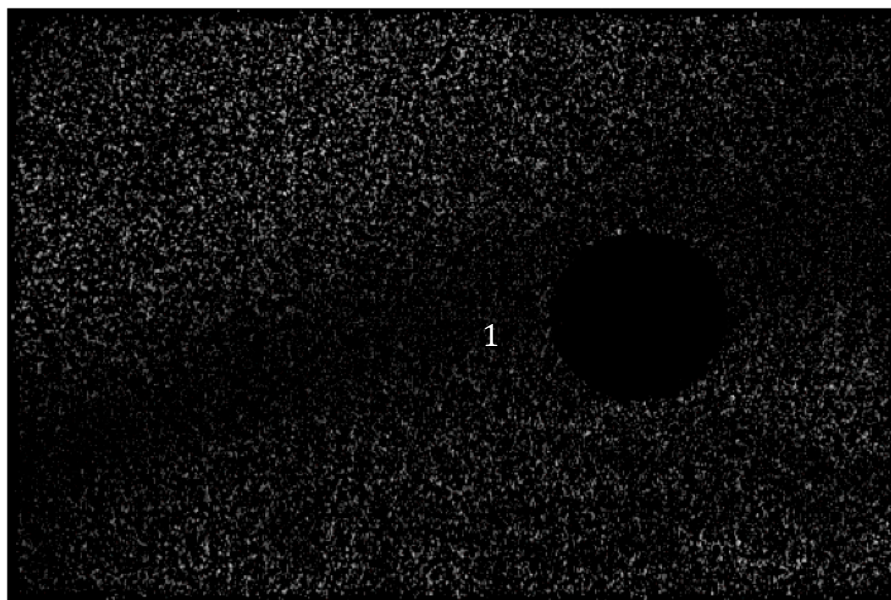


Figura 62: Franjas de interferencia obtenidas en la esquina inferior derecha para el eje y.

CAPÍTULO

VI.- Análisis mediante Elemento Finito de las deformaciones en sistemas optomecánicos.

En este capítulo se presentarán las simulaciones realizadas por el método de elementos finitos mediante el programa de diseño asistido por computadora (CAD por sus siglas en inglés) SolidWorks® para observar el comportamiento de fuerzas inducidas en placas metálicas, previamente estudiadas en el capítulo 4.

De esta manera se pretende verificar los datos experimentales con las simulaciones para determinar hasta que punto la técnica es capaz de medir desplazamientos menores a $1\mu\text{m}$.

6.1. Método de elementos finitos.

Existen multitud de problemas físicos cuya formulación desde un punto de vista matemático responde a una ecuación diferencial. Tal es el caso de la transmisión del calor, del electromagnetismo, la mecánica de fluidos o el análisis estructural.

En general, la resolución de las ecuaciones diferenciales que representan un problema físico son casi siempre de gran complejidad., solamente en los casos en donde se hacen simplificaciones sobre las dimensiones en que se estudia el problema y sobre las geometrías en que se resuelven estas ecuaciones, es posible obtener una solución analítica del problema. En dichos casos, tales simplificaciones conducen a ecuaciones diferenciales de fácil resolución [1].

Para todos los casos en los que las técnicas analíticas se salen del alcance, es donde los métodos numéricos tienen mucha utilidad. El Método de Elemento Finito (FEM, por sus siglas en inglés) es un método numérico de interpolación matemática que permite resolver conjuntos de ecuaciones diferenciales parciales.

Este método nace de la necesidad de poder predecir y resolver sistemas donde la geometría o las ecuaciones que lo gobiernan son lo suficientemente complejas que no pueda ser resuelta analíticamente. Si se quisiera representar la geometría con una sola función u operación global, tendría muchos parámetros y la solución del problema se complica. Es por eso que se escoge estudiar al sistema en componentes individuales, o elementos, cuyo comportamiento pueda conocerse sin dificultad. Una vez obtenidos cada uno de los resultados de cada elemento se continúa a ensamblar el sistema original para estudiarlo a partir de dichos componentes. Una serie de pasos muy simplificados de como funciona el elemento finito se presenta a continuación [2,3]:

- El elemento continuo se divide, mediante líneas, superficies o volúmenes imaginarios, en un número de elementos finitos.
- Se supone que los elementos están conectados entre sí mediante un número discreto de puntos, conocidos como nodos, situados en los contornos. Los desplazamientos de los nodos serán las incógnitas.
- Se toma un conjunto de funciones de forma o de interpolación que definan de manera única los desplazamientos dentro de cada elemento, tomando como base el movimiento de los nodos de cada elemento asociado.
- Con la información de los nodos, las propiedades materiales y las condiciones iniciales de cada elemento nos proporcionarán el estado de cada elemento y por consiguiente de su contorno.

6.2. Análisis por elementos finitos.

El proceso de generación de la solución mediante análisis por elementos finitos (FEA por sus siglas en inglés) usualmente se realiza por medio de una computadora y software de CAD el cual contiene herramientas para la resolución de ecuaciones diferenciales parciales de forma discreta e iterativa hasta que se alcanza convergencia en la solución, esto se efectúa mediante los siguientes pasos: definición de la geometría objeto de estudio, asignación de las propiedades físicas de los materiales, asignación de las condiciones de frontera, aplicación de las cargas, mallado de la geometría, resolución del problema y análisis de la solución[4,5,6]. Estos pasos se explican a continuación para el caso de nuestro problema físico en particular:

Definición de la geometría objeto de estudio

Consiste en la obtención de un dibujo en 2D o 3D de las formas de los diferentes objetos en los que se pretenden resolver las ecuaciones diferenciales parciales del fenómeno bajo estudio a través de métodos numéricos.

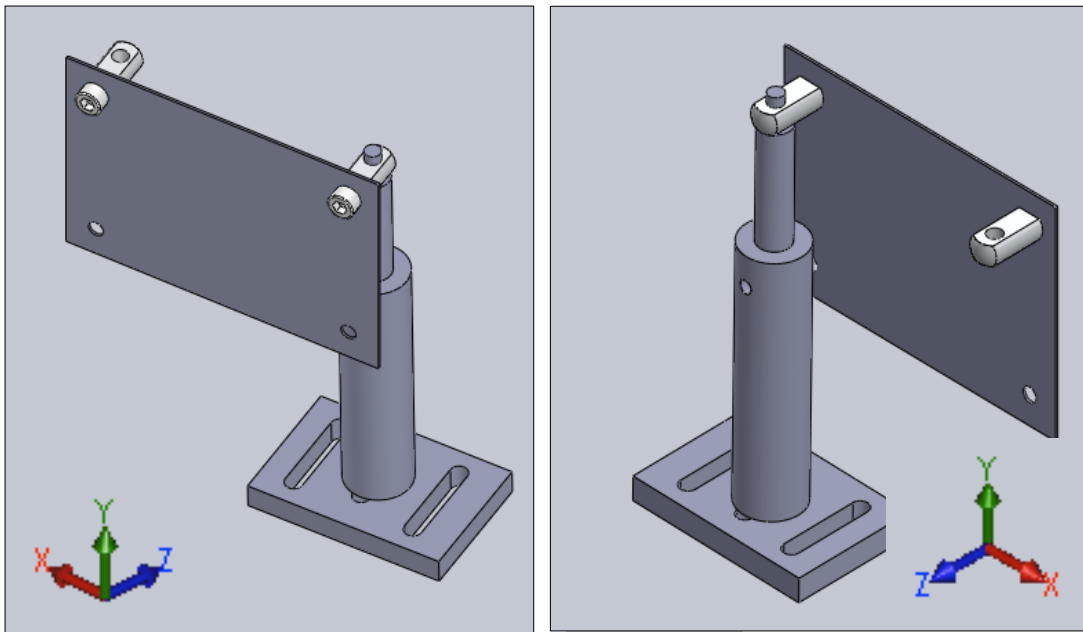


Figura 63: Modelo en 3D para el análisis de fuerzas mediante SolidWorks®

En nuestro caso se dibujó un sistema 3D mediante SolidWorks® de una placa metálica a la cual le es inducida una fuerza externa con el propósito de cuantificar los desplazamientos provocados en los ejes de movimiento (x,y) y de esta manera poder comparar los resultados obtenidos con la configuración experimental en plano previamente vistos en el capítulo 5 (véase Figura 63).

Asignación de las propiedades físicas de los materiales.

Es aquí donde las propiedades (tales como el modulo elástico, la densidad, conductividad, etc.) se asignan a cada uno de los objetos que se han generado en la fase de definición de la geometría.

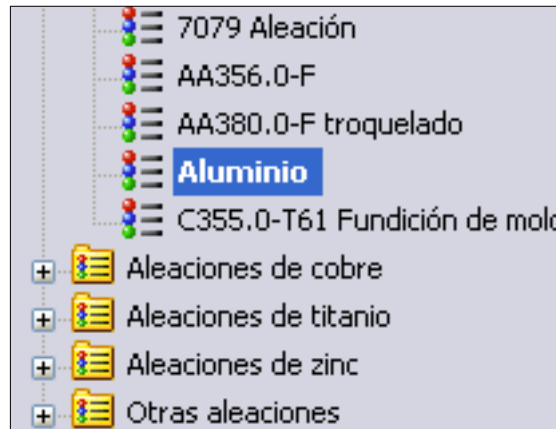
	Propiedad	Valor	Unidades
	Módulo elástico	6.900000067e+010	N/m ²
	Coeficiente de Poisson	0.33	N/D
	Módulo cortante	2.600000013e+010	N/m ²
	Densidad de masa	2700	kg/m ³
	Límite de tracción	310000002.1	N/m ²
	Compressive Strength in X		N/m ²
	Límite elástico	275000000.9	N/m ²
	Coef. de dilatación térmica	2.4e-005	/K
	Conductividad térmica	166.9	W/(m·K)

Figura 64: Propiedades y material utilizado para el análisis por elemento finito.

El material elegido para nuestros componentes fue aluminio, debido a que es el que tiene las características mas aproximadas a nuestro sistema de medición experimental, en la Figura 64 se observan los valores típicos y las unidades de cada una de las propiedades que lo componen.

Asignación de las condiciones de contorno.

Las condiciones de contorno más típicas que se aplican suelen ser la frontera entre sólidos, puede aplicarse también alguna restricción en cuanto a la sujeción, condiciones de equilibrio, temperatura, etc.

Tipo de contacto

☐ Sin penetración

☒ Unión rígida(Sin espacio libre)

☐ Permitir penetración

Con respecto a nuestras condiciones de contorno, se formó una unión rígida, es decir se ensamblaron todos los componentes para formar un sólido el cual recibirá la fuerza ejercida. Además se sujetó la base del poste óptico con la finalidad de que emular la sujeción de un tornillo.

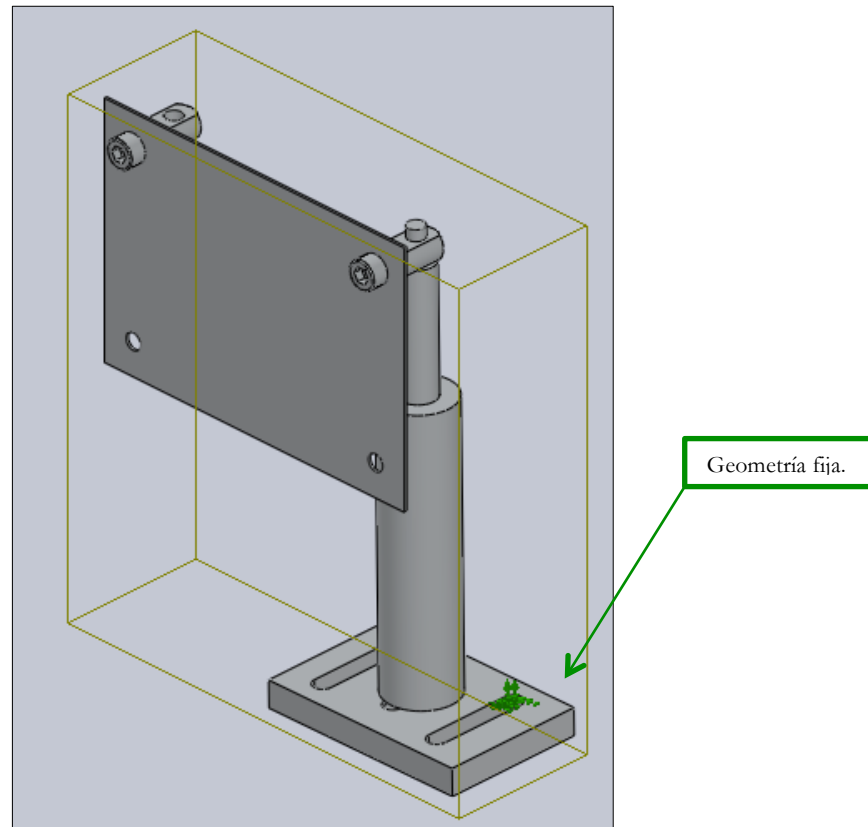


Figura 65: Condiciones de contorno.

Aplicación de las cargas.

Se entiende por cargas a las fuentes de fuerza externas aplicadas sobre el objeto bajo estudio y usualmente se expresan en Newtons. Para nuestro caso en particular se utilizaron dos fuerzas, la de gravedad y una externa aplicada en la esquina superior izquierda de la placa la cual se varió de 0 a 0.273 N.

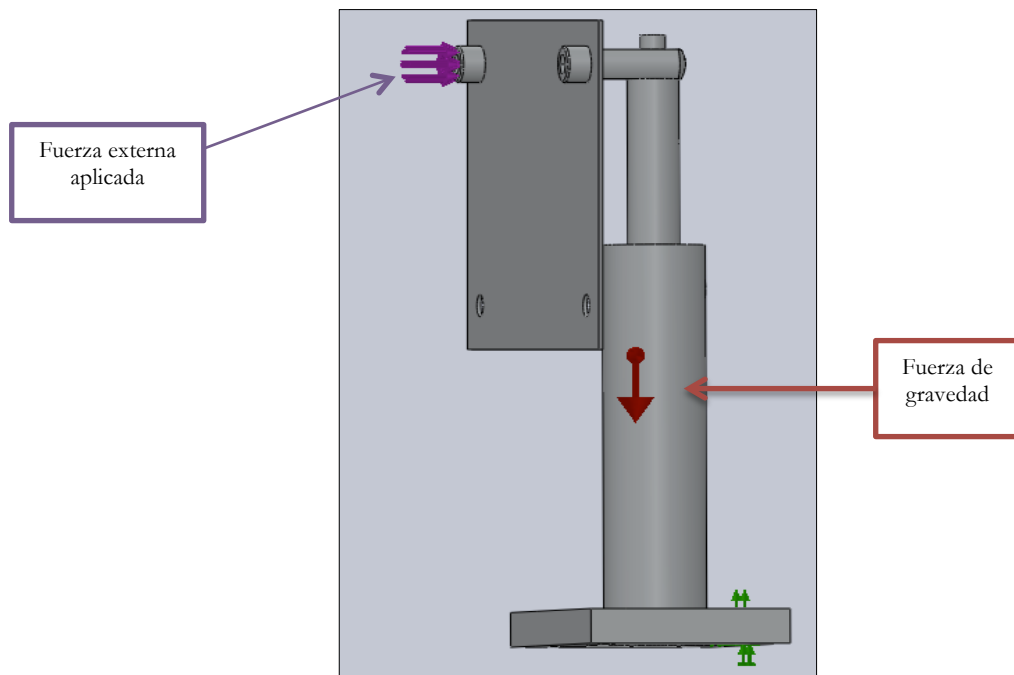


Figura 66: Aplicación de las fuerzas mediante SolidWorks

Mallado de la geometría

La geometría objeto de estudio se divide en diferentes elementos en los que resuelven las ecuaciones diferenciales. Estos elementos son divididos mediante herramientas que mallan de forma automática la zona que se pretende analizar.

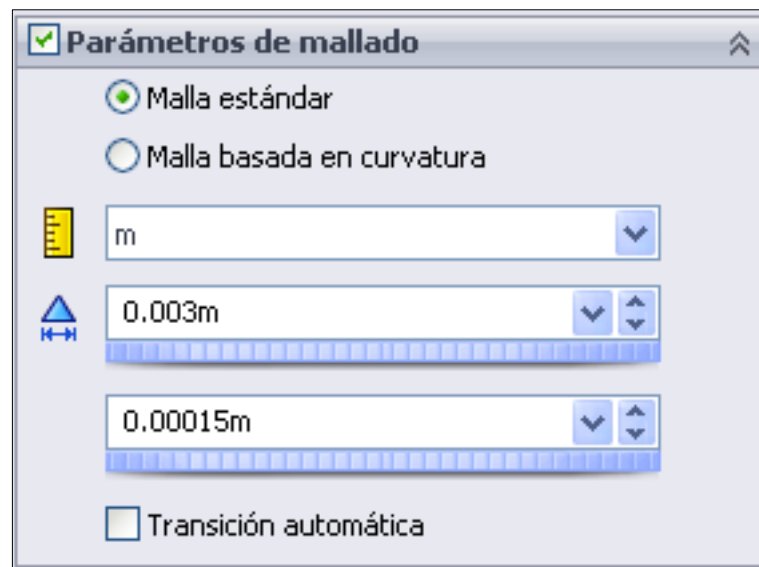


Figura 67: Parámetros de mallado. Para la geometría en FEA

Se eligió un mallado de 3 mm, tal y cómo se muestra en la Figura 67 y 68 , esto con la finalidad de tener el mayor número de nodos posibles que nos permitan la determinación de las deformaciones causadas por la fuerza aplicada. Cabe mencionar que entre mas pequeño sea el mallado mejor será la precisión del programa para determinar los efectos de carga en la superficie bajo estudio, sin embargo esto conlleva a mucho tiempo de procesamiento y recursos del sistema, además de que en muchos de los casos no proporciona información adicional con respecto a un mallado mayor, por lo que se hicieron varias pruebas en las cuales dicho valor resulto ser el mas adecuado para nuestro análisis.

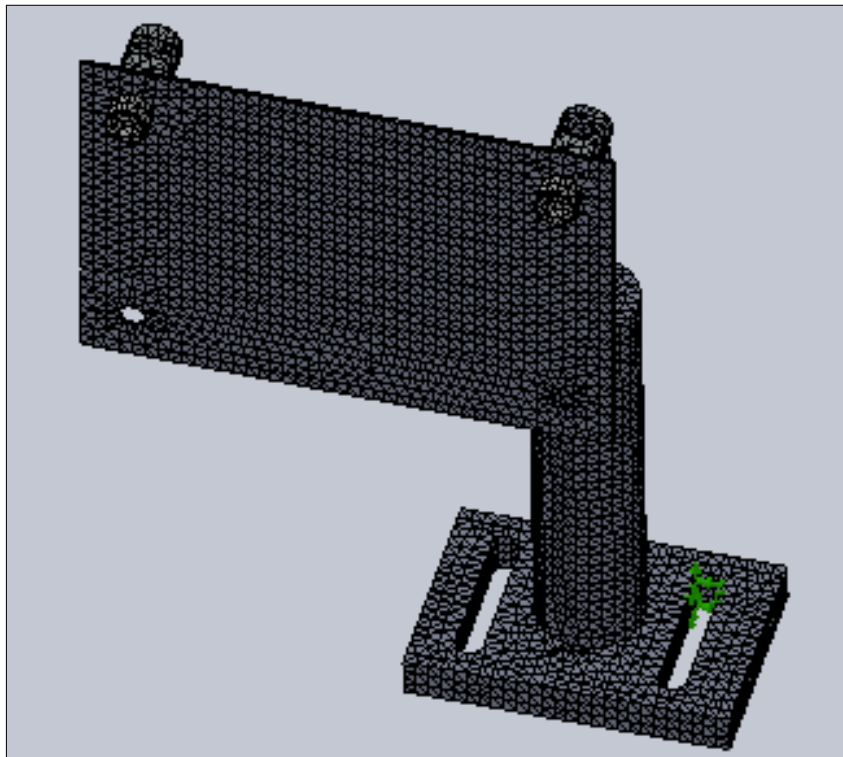


Figura 68: Geometría bajo estudio mallada en 3 mm.

Resolución del problema

En esta fase del proceso, es donde se aplica el método de análisis por elementos finitos para obtener la solución del problema físico de forma iterativa. La solución se obtiene en cada uno de los elementos en que se descompone la geometría.

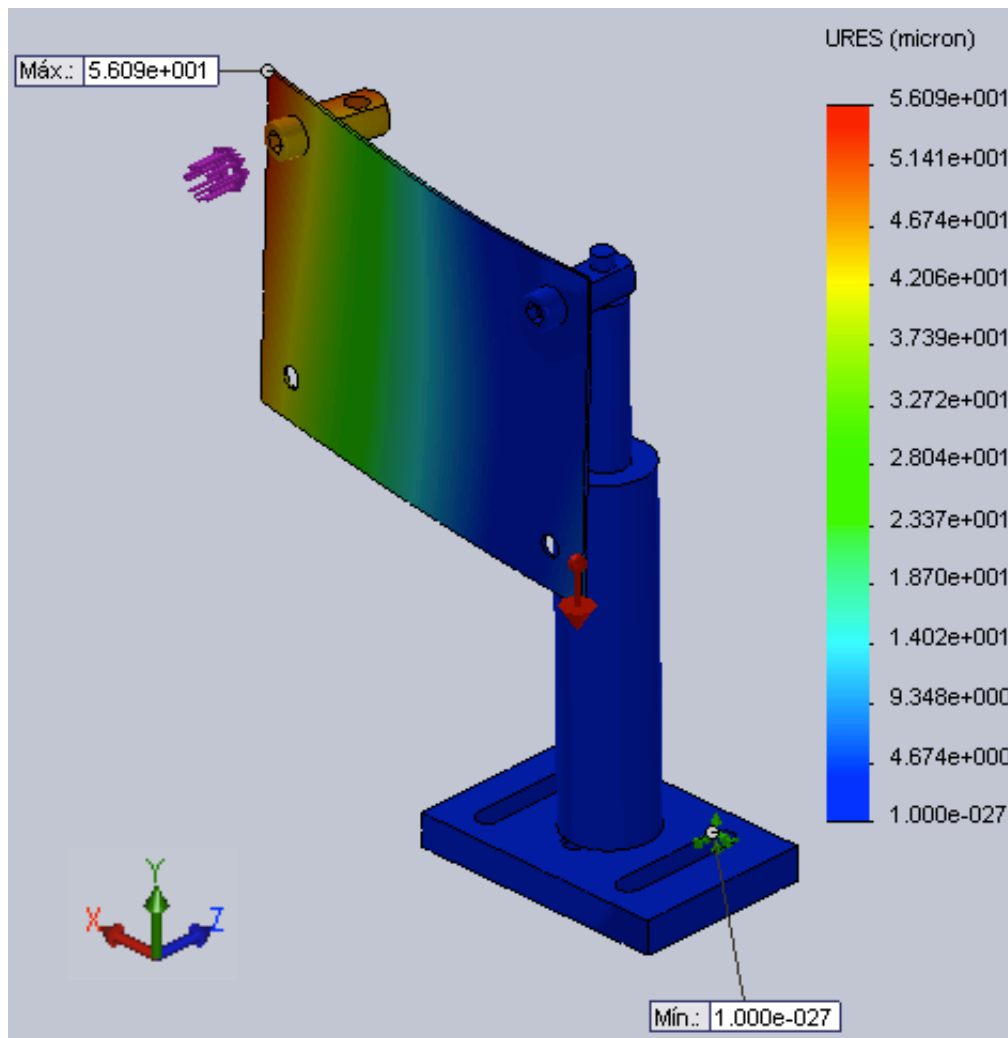


Figura 69: Deformación resultante en los 3 ejes coordenados (x,y,z).

En la Figura 69 se muestra la deformación resultante (en los tres ejes coordenados x,y,z) debido a una fuerza de 0.273 N, a si mismo se observa que el esfuerzo mínimo se centra principalmente en el eje de sujeción, y el máximo directamente en la posición donde se ejerció la fuerza.

Análisis de resultados

Una vez que se ha obtenido la solución del problema físico, la distribución fuerzas se puede emplear para calcular los desplazamientos resultantes. Para nuestro análisis es necesario descomponer las fuerzas en dos ejes de movimiento (x,y), los cuales serán presentados mas adelante.

En todo este proceso llevado a cabo para el análisis de FEA, la última etapa se conoce con el nombre de solución, la penúltima fase del proceso que antes mencionado se conoce con el nombre de postprocesamiento, y el resto de las fases se conocen con el nombre de preprocesamiento.

6.3. Resultados.

Una vez obtenida la deformación de nuestro fenómeno físico, se procede a descomponer las fuerzas en dos ejes (x,y), esto con la finalidad de poder obtener los desplazamientos resultantes y compararlos con ESPI mediante la configuración en plano realizada.

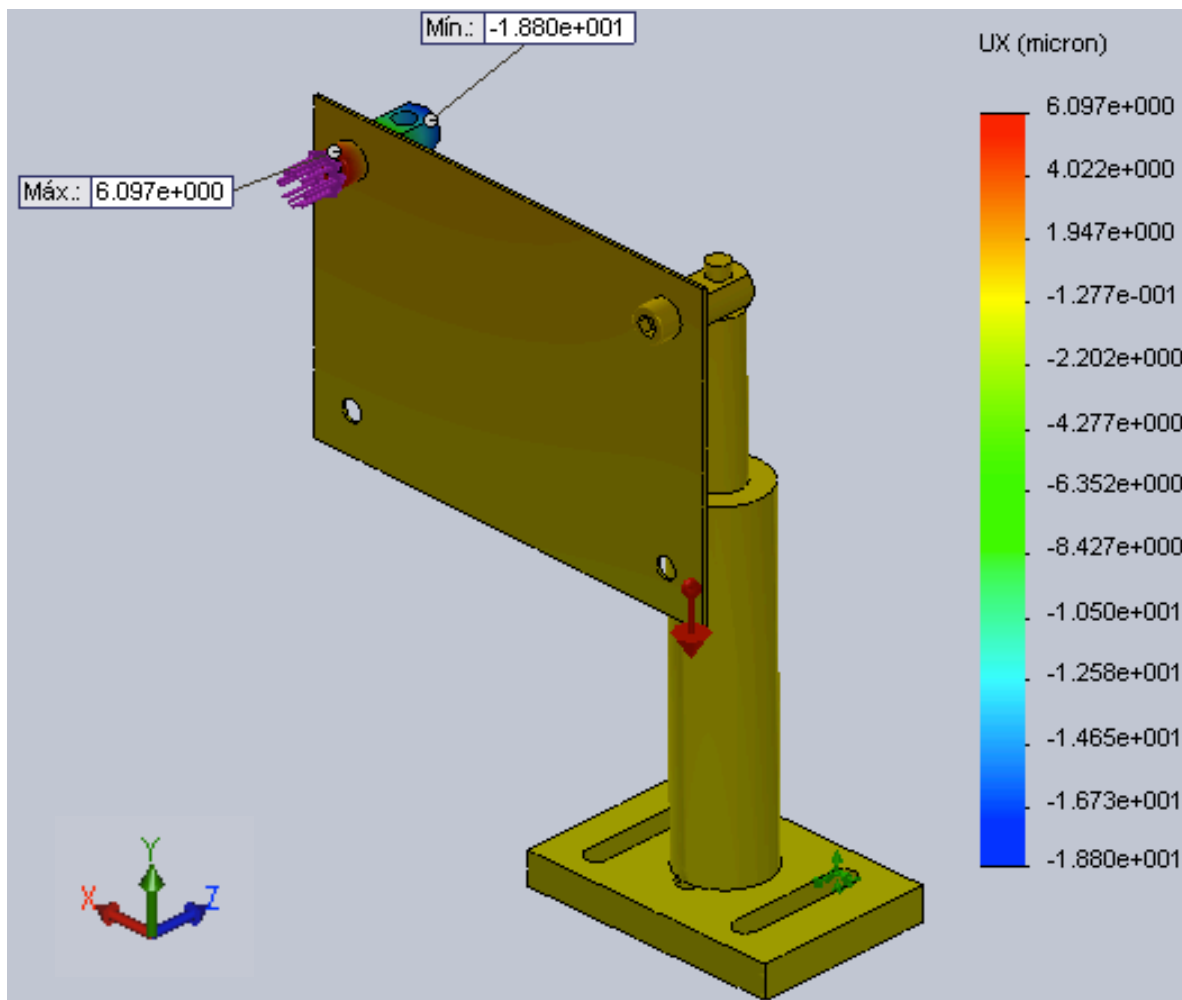


Figura 70: Análisis de deformaciones mediante FEA en Solidworks para el eje x.

Con respecto al eje x se puede observar que al igual que en los resultados experimentales, el desplazamiento máximo generado se encuentra en la esquina superior izquierda con un valor de $6.097\ \mu\text{m}$, es decir se tuvo un error del 3.09% con respecto a los resultados del montaje experimental (véase Figura 70).

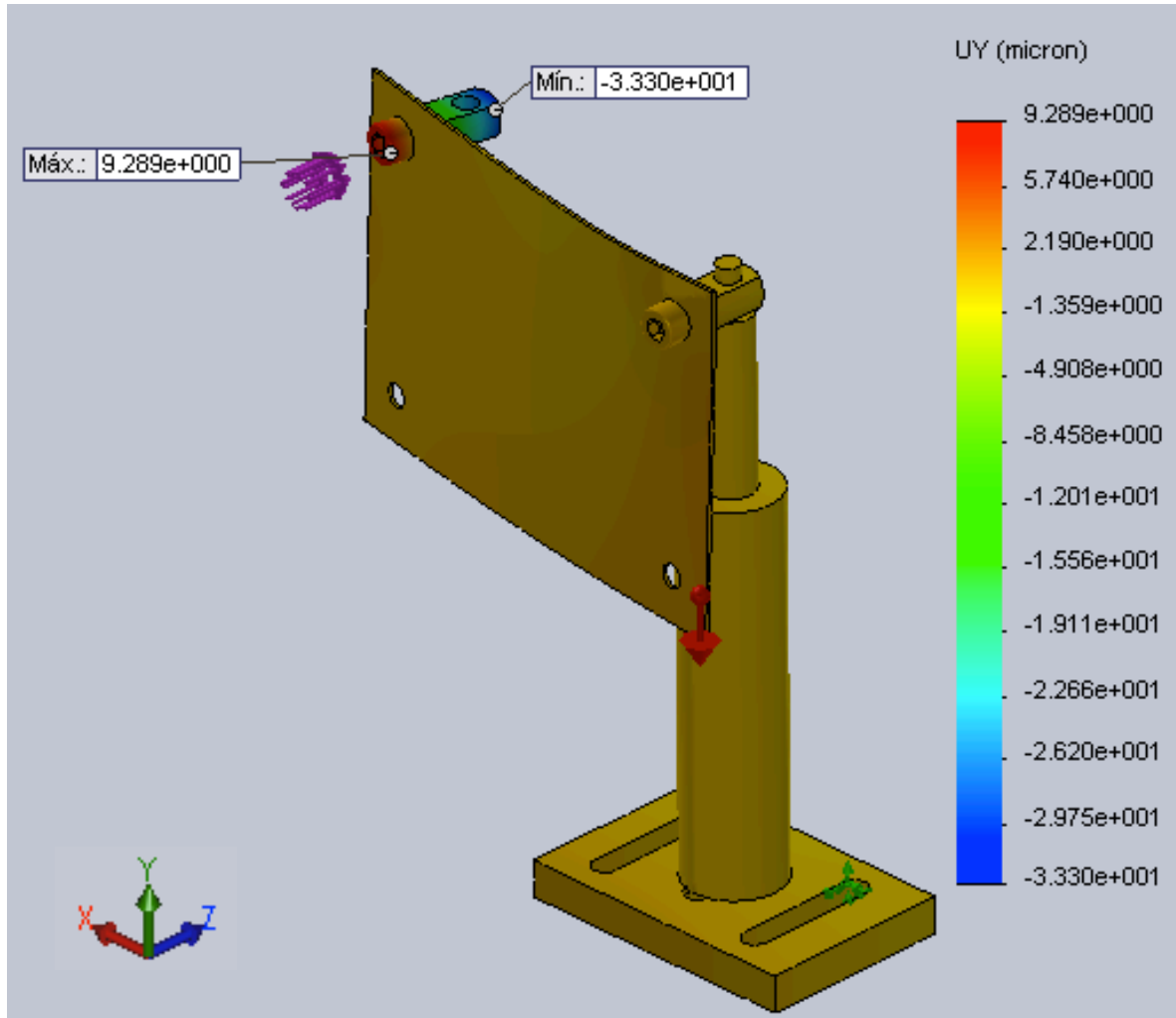


Figura 71: Análisis de deformaciones mediante FEA en Solidworks para el eje y.

Con respecto al eje y de igual manera se observa un desplazamiento máximo en la esquina superior izquierda con un valor de $9.289\ \mu\text{m}$, es decir se tuvo un error del 3.36% con respecto a los resultados del montaje experimental. Así mismo se observa que la esquina inferior derecha sufre desplazamientos debido a la fuerza inducida, tal y como lo habíamos previsto en los resultados experimentales (véase Figura 71).

Para ambos casos (eje x,y) se observa que no existe un desplazamiento en la esquina superior derecha (como ya se había previsto en la etapa experimental), esto debido a que la fuerza ejercida no actúa sobre esta parte de la placa ya que ésta se encuentra fija a un poste óptico que le impide moverse prácticamente en cualquier dirección.

A través de este análisis mediante FEA se puede comprobar de manera directa la efectividad de dicho instrumento para la medición de deformaciones en sistemas optomecánicos, donde se puede observar claramente que todos los resultados experimentales coinciden con las simulaciones.

CAPÍTULO

VII. Comparación de resultados.

En este capítulo se compararán los resultados experimentales y las simulaciones con la finalidad de determinar si la técnica es factible en la utilización de mediciones de deformaciones en sistemas optomecánicos y su aplicación en ambientes criogénicos. Así mismo se obtendrá el error de nuestro sistema, y la mínima resolución que este tiene para la medición de franjas de interferencia.

7.1. Resultados experimentales vs simulaciones

Una vez obtenidos los resultados experimentales y las simulaciones, se dió el siguiente paso para comparar los datos, para esto se realizó una serie de pruebas dentro del programa Solidworks® en las cuales se fue variando la fuerza aplicada a la placa de 0 a 0.273 N (proporcionales al número de franjas) y se obtuvo el desplazamiento generado por estas fuerzas a través de la simulación. Posteriormente con ayuda de la tabla obtenida experimentalmente se comparó la equivalencia de dichos desplazamientos con respecto el eje x (véase tabla 12).

#Franjas	Fuerza N	Desplazamiento experimental μm	Desplazamiento simulado μm
1	0.039	0.844	1.126
2	0.078	1.689	2.063
3	0.117	2.534	2.984
4	0.156	3.379	3.921
5	0.195	4.224	4.858
6	0.234	5.069	5.477
7	0.273	5.914	6.097

Tabla 12: Tabla de desplazamientos simulados y experimentales (eje x)

Posteriormente se obtuvo el error de cada uno de los desplazamientos, tal y como se muestra en la siguiente tabla:

#Franjas	Fuerza N	Error %
1	0.039	33.27
2	0.078	22.08
3	0.117	17.72
4	0.156	16.02
5	0.195	14.99
6	0.234	8.04
7	0.273	3.09

Tabla 13: Tabla de errores de desplazamientos con respecto al eje x.

Al igual que el análisis anterior, se realizó la misma metodología para poder comparar los resultados experimentales con las simulaciones pero esta vez para el eje y, en donde cada fuerza proporcional a una franja de interferencia fue simulada y comparada con su respectivo desplazamiento. A continuación se muestra la tabla de datos obtenida:

#Franjas	Fuerza N	Desplazamiento experimental μm	Desplazamiento simulado μm
1	0.019	0.748	0.973
2	0.039	1.497	1.918
3	0.058	2.246	2.863
4	0.078	2.995	3.714
5	0.097	3.744	4.319
6	0.117	4.493	5.131
7	0.136	5.242	5.887
8	0.156	5.991	6.643
9	0.176	6.740	7.399
10	0.195	7.489	7.966
11	0.215	8.237	8.722
12	0.254	8.986	9.289

Tabla 14: Tabla de desplazamientos simulados y experimentales (eje y).

Posteriormente se obtuvo el error de cada uno de los desplazamientos, tal y como se muestra en la siguiente tabla:

#Franjas	Fuerza N	Error %
1	0.019	29.92
2	0.039	28.05
3	0.058	27.43
4	0.078	23.98
5	0.097	15.34
6	0.117	14.18
7	0.136	12.29
8	0.156	10.87
9	0.176	9.77
10	0.195	6.36
11	0.215	5.87
12	0.254	3.36

Tabla 15: Tabla de errores de desplazamientos con respecto al eje y.

Como se puede observar en las tablas anteriores, nuestro sistema interferométrico es capaz de analizar desplazamientos mayores a 5 franjas de interferencia, esto debido principalmente a que sistema de captación y registro (CCD) está trabajando al límite de resolución, en donde el tamaño del píxel es considerablemente grande con respecto al tamaño del speckle, lo que conlleva a que el sistema necesite mayor cantidad de información para poder determinar los desplazamientos generados. Dicho de otra manera, se necesitarían mas píxeles por unidad de área para poder registrar un speckle ó en su defecto tener un número mayor de speckles mediante mas franjas de interferencia y por consiguiente mas información del desplazamiento generado.

En la Figura 72, se muestra una grafica comparativa entre el desplazamiento experimental con respecto al simulado mediante elemento finito para el eje x, en donde se aprecia claramente que entre mayor sea el numero de franjas, el desplazamiento entre ambos métodos se aproxima de tal manera que convergen a una misma solución. Cabe destacar que esta relación podría mejorarse considerablemente si se hiciera un estudio cuantitativo de las propiedades de los materiales utilizados y posteriormente ingresarlos al modelo de elemento finito de tal manera que en ambos casos se tuvieran bien definidas las mismas propiedades, haciéndose el análisis prácticamente en el mismo material.

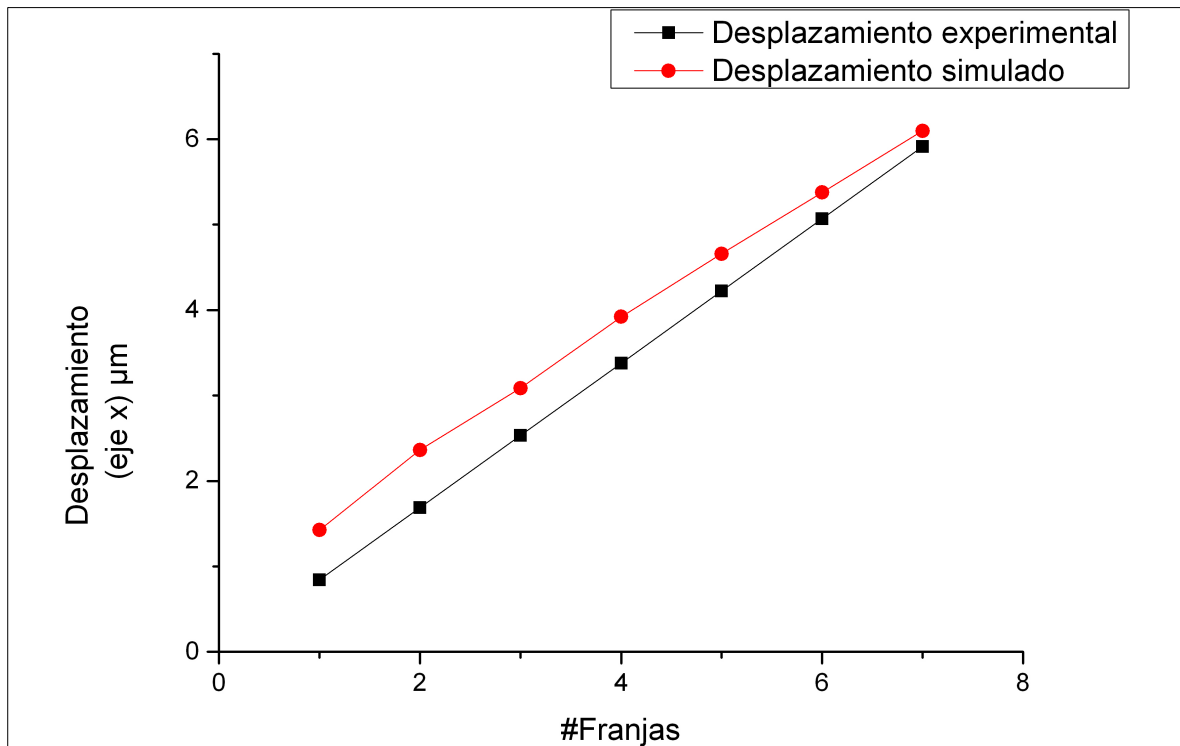


Figura 72: Grafica comparativa de desplazamientos para el eje x

En la Figura 73 se muestra el porcentaje de error entre las dos técnicas utilizadas, en ella se observa que a partir de cinco franjas de interferencia el error disminuye a un 15%, esto se puede atribuir a que entre más numero de franjas se tengan, habrá mayor cantidad de información de la deformación producida y por consiguiente un mayor numero de speckles para el procesamiento de imágenes en el CCD.

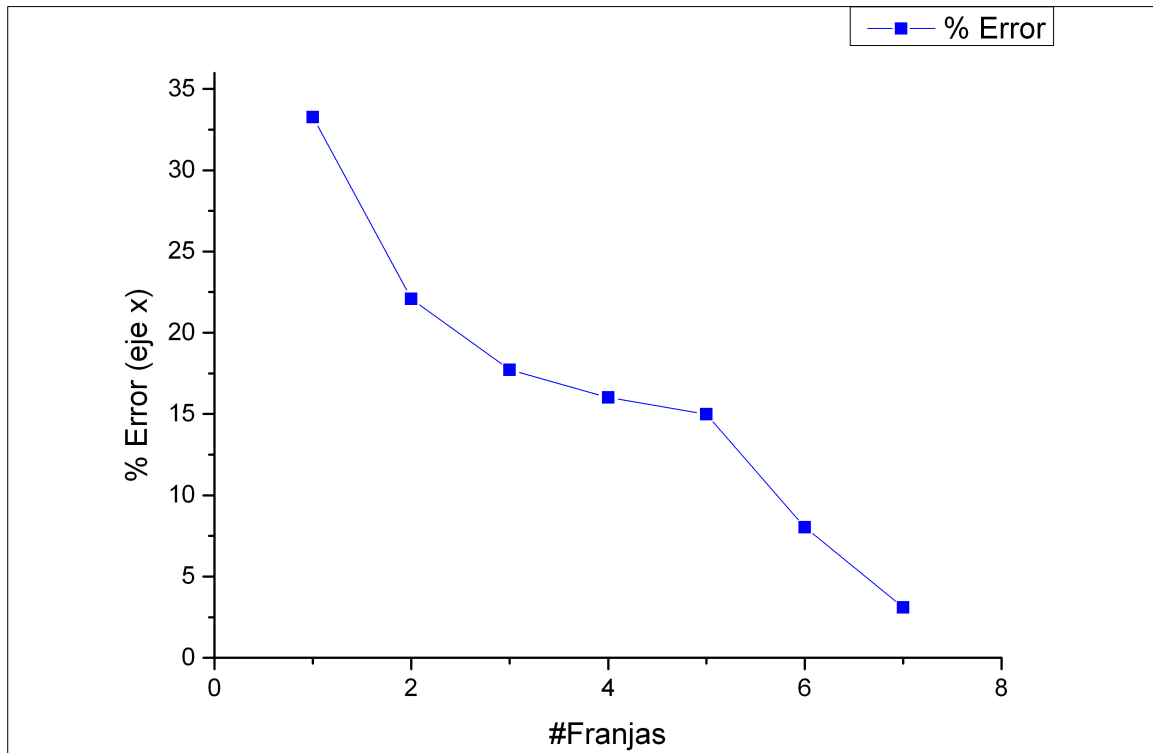


Figura 73: % Error (Experimental vs Simulación) para el eje x.

En la figura 74 se muestra el grafico comparativo entre el desplazamiento experimental y el simulado para el eje y, al igual que en el caso anterior se puede observar que se reduce a partir de 5 franjas de interferencia, lo cual es satisfactorio para mediciones de alrededor de algunas decenas de micras, con lo que se puede garantizar su adecuado funcionamiento para el análisis de deformaciones en ambientes criogénicos.

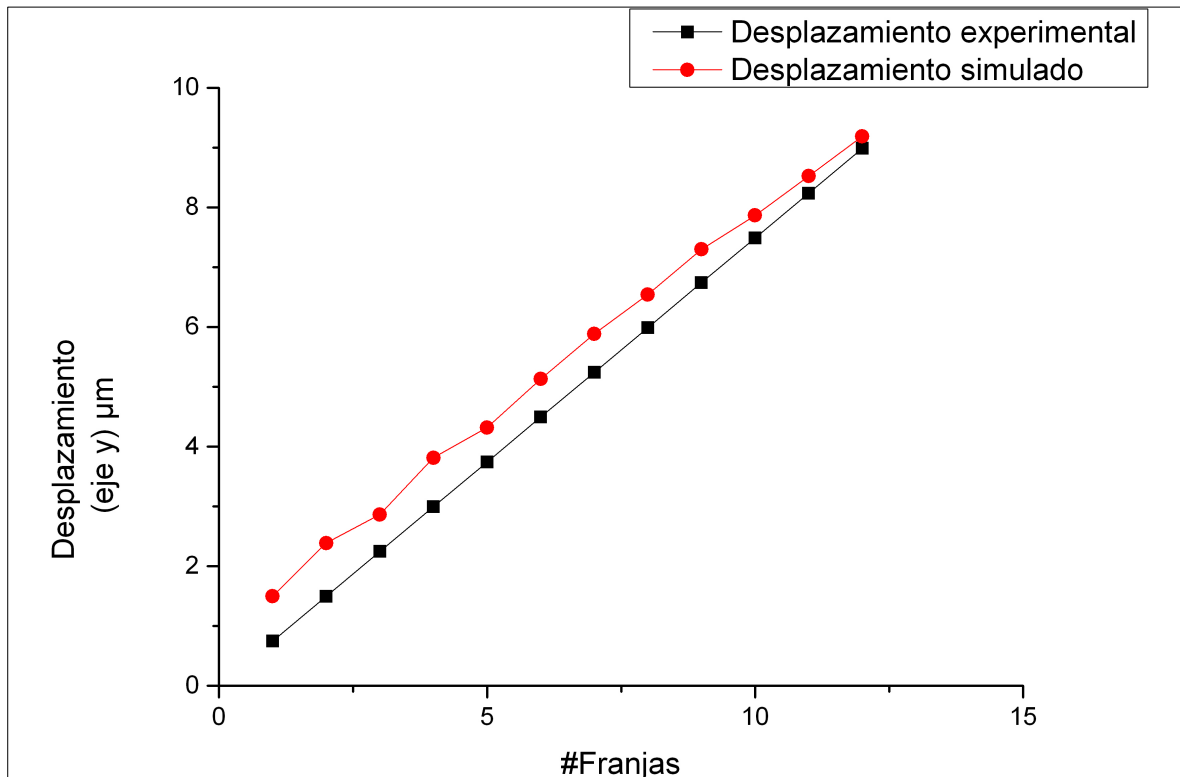


Figura 74: Grafica comparativa de desplazamientos para el eje y.

Con respecto al porcentaje de error (véase Figura 75) para el eje y se observa que a partir de 5 franjas de interferencia se tiene una dispersión prácticamente lineal, esto conlleva a que el sistema de medición tienda cada vez a un valor mas certero para el análisis de la solución tanto en elemento finito como experimentalmente, es decir que el sistema converge o es capaz de detectar un mínimo de 5 franjas para su adecuado funcionamiento.

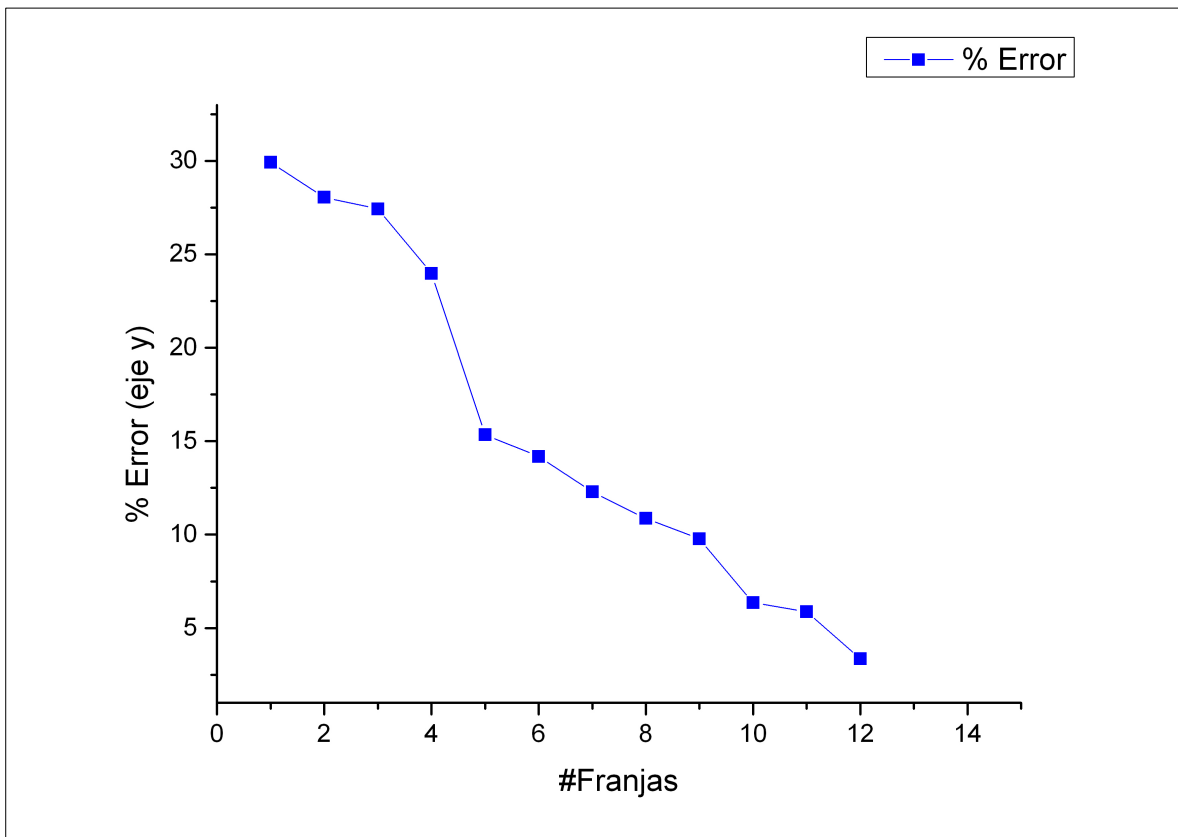


Figura 75: % Error (Experimental vs Simulación) para el eje y

CAPÍTULO

VIII.- Conclusiones.

Como se ha mostrado en los capítulos anteriores, se ha desarrollado un sistema interferométrico (en configuración en plano) capaz de medir deformaciones mayores a 5 franjas de interferencia equivalentes a $4\text{ }\mu\text{m}$ de desplazamiento, lo cual da una pauta en la investigación de este trabajo debido a que se requieren medir desplazamientos de alrededor de $30\text{ }\mu\text{m}$ para determinar si los flejes ópticos de FRIDA son capaces de autocentrarse en su totalidad. Por lo que el diseño de este interferómetro cumple con los requerimientos de alto nivel que se necesitan, teniendo como resultados la visualización en tiempo real de cada una de las fuerzas que interactúan directamente sobre cualquier superficie rugosa para determinar sus respectivos desplazamientos en los ejes coordenados (x,y).

Cabe señalar que el diseño propuesto funcionaría de una manera mas precisa, si se contara con una cámara cuyo tamaño del píxel fuese mucho menor al del speckle, esto con el fin de garantizar que el sistema sea capaz de resolver de manera adecuada el número de franjas experimentado y por consiguiente la determinación de los desplazamientos. En una primer aproximación (configuración fuera de plano) se utilizó una cámara cuyo tamaño del píxel fue de $2.7\text{ }\mu\text{m}$, la cual resulto muy idónea para caracterizar el speckle sin embargo no fue muy factible su uso debido a que no se pudo observar en tiempo real el número de franjas experimentado, es por eso que para esta última etapa se optó por utilizar una videocámara de baja resolución cuyo tamaño del píxel fue de $8.4\text{ }\mu\text{m}$ la cual modificó de manera directa la precisión de nuestro sistema, sin embargo como ya se había mencionado, requerimos de una incertidumbre de alrededor de algunas micras por lo que es muy factible su utilización en nuestro experimento.

Con esto se garantiza la construcción de un interferómetro de bajo costo, fiable y con la capacidad de ser implementado prácticamente en cualquier sistema donde se requieran medir deformaciones mayores a $4\text{ }\mu\text{m}$ ya sea en ambientes criogénicos o a temperatura ambiente. Cabe mencionar que nuestro sistema de medición interferométrico debe ser previamente calibrado antes de su utilización, es decir, las lentes deben ser ajustadas de tal manera que nos proporcionen los valores obtenidos en la Figura 50 (grafica de desplazamiento vs franjas de interferencia), para ello es necesario correr el programa de visualización franjas de interferencia en tiempo real, posteriormente mediante un micrómetro de precisión (platina de traslación) hacer un barrido de tal manera que el desplazamiento sea proporcional a cada una de las franjas de interferencia.

Cabe destacar que este trabajo de investigación se presentó en el 1er Congreso Iberoamericano de Instrumentación y Ciencias Aplicadas (CIICA-2013). Al final se incorpora la constancia de participación como parte de los anexos.

8.1. Trabajo a Futuro

- Reducir el tamaño de nuestro sistema de tal manera que su utilización sea práctica, es decir, integrar todos los componentes previamente ajustados y calibrados en un solo dispositivo, esto con la finalidad de poder medir no solo deformaciones, sino también fracturas, caracterizar materiales, etc. Ya que en general esta técnica podría tener un sin fin de aplicaciones por lo que sería factible que tuviera portabilidad.
- Caracterizar la rugosidad con respecto al tamaño del speckle, esto con la finalidad de poder determinar hasta que punto nuestro interferómetro es capaz de medir franjas de interferencia de acuerdo a la superficie utilizada, para ello se utilizaron distintos tipos de abrasivos los cuales fueron depositados en vidrios con cuyos tamaños de grano variaban considerablemente. Cabe mencionar que esta parte se encontraba desarrollando por expertos en pulido óptico del instituto de astronomía, sin embargo se dejó como trabajo a futuro por la limitante en tiempo con la que se contó.
- Agregar gradientes de temperatura a nuestro objeto bajo estudio, para observar como se desenvuelve con respecto a diferentes condiciones de frontera en el medio. Así mismo realizar el análisis respectivo mediante FEA para corroborar los resultados obtenidos y caracterizar los rangos de operación en los cuales este trabajaría adecuadamente.
- Realizar una interfaz grafica con el usuario con la cual se puedan modificar de manera mas sencilla parámetros característicos de la cámara a utilizar, además de que este cuente con un sistema de conteo de franjas que nos permita reiniciar la pantalla cuando se encuentre saturada por un gran número de franjas sin perder el conteo previo que se tenía.

8.2. Aplicaciones futuras.

En la actualidad, la interferometría y las técnicas ópticas parecen tener un futuro prometedor en cuanto al análisis de las ciencias de la salud, pues éstas tienen la ventaja de ser no invasivas, no ionizantes y fáciles de implementar, altamente eficientes y baratas [1]. Recientemente se han desarrollado métodos para detectar morfologías celulares alteradas por medio de la interferometría. Las alteraciones en estructura celular son asociadas al cáncer en sus etapas tempranas, por lo que el empleo de dicha técnica puede representar una herramienta poderosa para el diagnóstico de este padecimiento. Además, la capacidad de la interferometría para medir desplazamientos sumamente pequeños permite estudiar con alta precisión el crecimiento o disminución del tamaño de tumores.

La interferometría también es aplicada como una técnica no invasiva para estudiar el avance o recuperación de fracturas óseas [2]. Otra de las mas reconocidas investigaciones dentro de la ingeniería biomédica consiste en medir la velocidad del flujo de sangre por medio de una técnica especial de interferometría ultrasónica donde dos pulsos son emitidos simultáneamente por dos láseres de cristal y pasan a través de los vasos sanguíneos, los pulsos son recibidos nuevamente por los láseres y la diferencia de fase entre ellos es empleada para calcular la velocidad de flujo [3].

Referencias

Capítulo 1

- [1] Conley, R. T., Ruiz, R. A., & Martínez, J. C. (1979). *Espectroscopia infrarroja*. Editorial alhambra.
- [2] http://www.espectrometria.com/espectrometra_infrarroja
- [3] http://legacy.spitzer.caltech.edu/espanol//edu/ir/spectra/irspec_sp.html
- [4] <http://www.astroscu.unam.mx/proyectos/frida/design.html.en>
- [5] <http://www.iac.es/proyecto/OSIRIS/>
- [6] <http://www.astrosurf.com/juliocesar/filtros.htm>
- [7] <http://www.iac.es/gabinete/difus/ciencia/silbia/mecagtc.htm>
- [8] <http://www.revista.unam.mx/vol.10/num10/art65/int65-3.htm>

Capítulo 2

- [1] Lengyel, B. A. (1962). *Lasers: generation of light by stimulated emission*. Wiley.
- [2] <http://es.wikipedia.org/wiki/Láser>
- [3] Resnick, R., Halliday, D., & Krane, K. S. (1982). Física Volumen II. *Editorial Continental*.
- [4] Goodman, J. W. (1975). Statistical Properties of Laser Speckle Patterns. In *Laser Speckle and Related Phenomena*, Dainty J. C., Springer- Verlag, Berlin.
- [5] Jones, R. and Wykes, K. (1989). *Holographic and Speckle Interferometry*. Cambridge Studies in Modern Optics. Cambridge University Press, second edition.
- [6] Fernando A. Marengo Rodriguez. Medición de la distribución de fase en interferometría de speckle temporal usando descomposición empírica de modos y transformada de Hilbert. PhD thesis, Universidad Nacional de Rosario, Facultad de Ciencias Exactas, Rosario Argentina 2008.

- [7] Dainty J.C. (1984) *Láser Speckle and Related Phenomena* Ed. Springer-Verlag,
- [8] Daniel Malacara. *Óptica básica*. Fondo de cultura económica, 2004.
- [9] Casas, Justiniano. *Óptica*. Universidad de Zaragoza, Cátedra de Óptica, 1978
- [10] http://es.wikipedia.org/wiki/Apertura_numérica
- [11] Hariharan, P. (2010). *Basics of interferometry*. Access Online via Elsevier.
- [12] H.J. Puga, R. Rodríguez-Vera y A. Martínez, *Optics and Laser Technology* 34 (2002) 81.

Capítulo 3

- [1] Vannoni, M., and G. Molesini. "In-plane, out-of-plane, and time-average speckle interferometry experiments with a digital photcamera." *OPTO-Ireland*. International Society for Optics and Photonics.
- [2] Rodriguez, D., et al. "In-plane electronic speckle pattern of interference (ESPI) with optical fibre system applied to the study of the human jaw." *Medical engineering physics* 26.5 (2004): 371-378.
- [3] R.R. Sirohi, *Speckle Metrology*, (Marcel Dekker, New York, 1993).
- [4] Kreis, T. (1996). *Holographic Interferometry: Principles and Methods*. Akademie Verlag, Berlin.
- [5] Robinson, D.W., and D.C. Williams. "Digital phase stepping speckle interferometry" *Optics communications* 57.1 (1986): 26-30.
- [6] D. Malacara, M. Servin, Z. Malacara. *Interferogram analysis for optical testing*. Marcel Dekker, New York (1998).
- [7] Jacquot, Pierre. "Speckle interferometry: a review of the principal methods in use for experimental mechanics applications." *Strain* 44.1 (2008): 57-69.
- [8] Creath, Katherine. "Phase-shifting speckle interferometry." *29th Annual Technical Symposium*. International Society for Optics and Photonics, 1985.

[9] Lehtonen, Petri, and Yuankun Liu. "A compact LED-based phase measuring deflectometry setup." *SPIE Optical Engineering Applications*. International Society for Optics and Photonics, 2010.

Capítulo 4

[1] Kuan, Darwint, et al. "Adaptive restoration of images with speckle." *Acoustics, Speech and Signal Processing, IEEE Transactions on* 35.3 (1987): 373-383.

[2] <http://mecfunnet.faii.etsii.upm.es/difraccion/interfholspk/aspk.html>

[3] Gonzalez, Rafael C., Richard E. Woods, and Steven L. Eddins. *Digital image processing using MATLAB*. Vol. 2. Knoxville: Gatesmark Publishing, 2009.

[4] <http://proton.ucting.udg.mx/tutorial/vision/cursovision.pdf>

[5] <http://www.slideshare.net/lonely113/procesamiento-digital-de-imagenes-con-matlab>

[6] <http://www.mathworks.com/products/image/>

[7] http://www.elai.upm.es/webantigua/spain/Asignaturas/MIP_VisionArtificial/

[8] Ronald, E. Walpole, and H. HYERS RAYMOND. *Probabilidad y estadística*. McGraw Hill, 1994.

Capítulo 5

[1] Shchepinov, Valeriĭ Pavlovich, and Vladimir S. Pisarev. "Strain and stress analysis by holographic and speckle interferometry." *Measurement Science and Technology* 7.9 (1996).

[2] Martínez, A., J. A. Rayas, and J. C. Madrid Garay. "Medición de la evolución temporal de los campos dinámicos de desplazamiento mediante interferometría de moteado para una probeta de latón." *Revista mexicana de física* 56.3 (2010): 262-267.

[3] Martínez, A., J. A. Rayas, and Ramón Rodríguez Vera. "Medición del módulo de Young en el hule látex usando ESPI." *Revista mexicana de física* 49.006 (2009).

[4] José D., Ángel S., Luis S., Departamento de Física Aplicada. Aplicaciones del Moteado láser Revista Industria XXI (Núm. 8 - Abril 2005)

[5] Rodríguez-Vera, R., et al. "Algunas Aplicaciones Industriales de la Interferometría Electrónica de Patrones de Moteado." *Símposio de Metrología, CENAM, Querétaro*. 2001.

[6] R. Martínez Celorio, Técnicas Híbridas Espacio-Temporales en Interferometría de Moteado Para la Detección de Fenómenos Continuos, Tesis Doctoral, Centro de Investigaciones en Óptica A.C., León, Guanajuato, (2001).

[7] Creath, Katherine. "Phase-measurement interferometry techniques." *Progress in optics* 26.26 (1988): 349-393.

Capítulo 6

[1] Chandrupatla Tirupathi R. Introducción al estudio del elemento finito en ingeniería. ED. Prentice Hall. 2ª Edición, México, 1999.

[2] Zienkiewicz O.C. El método de los elementos finitos. McGraw Hill, 4ª Edición, España, 1994.

[3] Bhatti M.Asghar. Fundamental Finite Element Analysis and Applications. Wiley, Third Edition, EUA, 2005.

[4] Guerrero, Martha, et al. "Aplicación del método de elemento finito al análisis nodal." *Ingenierías* 2.3 (1999): 49.

[5] http://es.wikipedia.org/wiki/Método_de_los_elementos_finitos

[6] http://es.wikipedia.org/wiki/Análisis_de_elementos_finitos

[7] Mihaylova, E., et al. "Mechanical characterization of unplasticised polyvinylchloride thick pipes by optical methods." *Optics and lasers in engineering* 41.6 (2004): 889-900.

[8] <http://www.solidworks.es/sw/products/fea-cfd-simulation-software.htm>

[9] <http://grupocarman.com/blog/solidworks-simulation/>

[10] <http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/10907/4/Anàlisi.pdf>

[11] <http://www.solidworks.com>

Capítulo 7 y 8

[1] Luo, Qingming (2010). Optics in health care and biomedical optics, Proceedins of the SPIE, Vol. 7845, pp. 11.

[2] Claudia S. Gallardo, Alejandro D. Ramírez, La interferometría y sus aplicaciones científicas e industriales, ISSN 2007-3585, Vol. 6, No. 3, enero-abril 2013.

[3] Rader, Roland D. (1974) An interferometric blood flow measurement technique - A brief analysis, Vol. 21, pp. 293-297.

Apéndice

A- Código fuente

%Programa para la resta de imágenes.

```
clc
close all
clear all;
I = imread('PLANE00180.jpg');
J = imread('PLANE00181.jpg');
[m, n]=size(I);
[m, n]=size(J);
Ip=(I-J);
figure(1)
imshow(I)
figure(2)
imshow(J)
figure(3)
imshow(Ip);
figure(4)
imshow(abs(Ip));
```

%Programa para la realización del video mediante imágenes.

```
clc
clear all
close all

vid = videoinput('winvideo',1,'UYVY_720x480');
%set(vid, 'FramesPerTrigger', Inf);
set(vid, 'ReturnedColorspace', 'rgb')
src = getselectedsource(vid);
vid.FramesPerTrigger = 1;
get(src);
set(src, 'Saturation',128);
set(src, 'Brightness',128);
set(src, 'Contrast',128);

preview(vid);

numFotos =10%get(readerobj, 'numberOfFrames');

for p=1:numFotos;
    J=getsnapshot(vid);
    pause(0.5);
    figure(p)
    imshow(J),title(p);
```

```

        imwrite(J, strcat(num2str(p), '.jpg'));
    end
    stop(vid);

    I = imread('/Users/Taque/Documents/MATLAB/1.jpg');

    for k = 1:numFotos;

        jpgfilename = strcat('/Users/Taque/Documents/MATLAB/', num2str(k),
            '.jpg');
        J = imread(jpgfilename);

        % resta de frames J de la primer imagen-frame I

        K=J-I;

        figure,
        imshow(K);title('imagen de cada frame');

        h(k)= getframe(gcf); % captura la imagen activa.

        imagename=strcat(int2str(k), '.jpg');

        imwrite(h(k).cdata, strcat('/Users/Taque/Documents/MATLAB/', imagename));

    end

    %Programa para el video en tiempo real.

    close all
    clear all
    clc

    vid=videoinput('winvideo',1,'UYVY_720x480');
    set(vid, 'FramesPerTrigger', Inf);
    set(vid, 'ReturnedColorspace', 'grayscale')
    get(src);
    set(src, 'Saturation',128);
    set(src, 'Brightness',128);
    set(src, 'Contrast',128);

    vid.FrameGrabInterval = 5;
    start(vid)
    J=getsnapshot(vid);
    imshow(J)
    imwrite(J, 'foto_prueba.jpg') %
    I = imread('/Users/Taque/Documents/MATLAB/foto_prueba.jpg');

```



```

while(vid.FramesAcquired<=500)
% se toma una snapshot del stream y se la almacena en data para trabajar
mas
%facil
data = getsnapshot(vid);
imshow(data-I)
end

% aqui terminan los 2 bucles

% detenemos la captura
stop(vid);

%FLUSHDATA remueve la imagen del motor de adquisicion y la almacena en el
buffer
flushdata(vid);

% borramos todo(como en cualquier programa)
clear all
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

B- Videocámara Watec



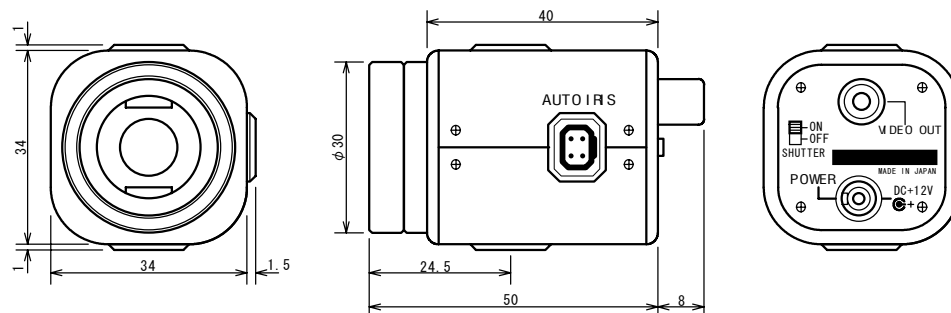
WAT-902H

Monochrome camera

【SPECIFICATIONS】

Model	WAT-902H (EIA, CCIR)
Pick-up element	1/2inch Interline transfer CCD image sensor
Number of total pixels	811(H) × 508(V) : (EIA) 795(H) × 596(V) : (CCIR)
Number of effective pixels	768(H) × 494(V) : (EIA) 752(H) × 582(V) : (CCIR)
Unit cell size	8.4 μm(H) × 9.8 μm(V) : (EIA) 8.6 μm(H) × 8.3 μm(V) : (CCIR)
Scanning system	2:1 interlace
Synchronizing system	Internal
Video output	Composite Video, 1 Vp-p, 75ohm Unbalanced
Resolution(Horizontal)	570TV lines(center)
Minimum illumination	0.002 lx. F1.4 (AGC Low) 0.0003 lx. F1.4 (AGC High)
Gamma correction	$\gamma \approx 0.45$
AGC	Hi:5~50dB, Lo:5~32dB
S/N Ratio	46dB (AGC OFF)
AE mode	ON(Electronic iris): 1/60~1/100000sec. (EIA) 1/50~1/100000sec. (CCIR) OFF: 1/60 (EIA), 1/50 (CCIR)
Back light compensation	ON
Lens mount	CS-mount
Installation screw	U 1/4inch (D=5mm) (Top/Bottom)
Connection terminal	Video out(RCA), Power, Auto iris
Power supply	DC +10.8~13.2V (12V±10%)
Current	Max. 160mA
Operating temperature	-10°C ~ +40°C
Storage temperature	-30°C ~ +70°C
Dimensions	35.5(W) × 36(H) × 58(L) mm
Weight	Approx. 90g
Accessories	DC-plug(WPDC12), Iris-plug(AIC)

【DIMENSIONS】 (mm)



Watec CO., LTD.

1 / 1

W121085-B00B

C- Macro y zoom



MACRO VIDEO ZOOM LENS (18-108, F/2.5)

FOR VIDEO APPLICATIONS REQUIRING LARGER FIELDS-OF-VIEW

MACRO VIDEO ZOOM LENS

Optem International announces the new 18-108 Macro Video Zoom Lens which is designed to attach directly to a video camera. This is the ideal optical solution for those applications requiring large fields-of-view.

This unique lens includes a special "close-up" lens that allows it to function with a working distance as close as 5.5–11 inches. When the "close-up" lens is removed, it will function from 11" out to infinity.

FEATURES/ADVANTAGES

Optem International currently offers a complete line of higher-magnification Zoom Optical Systems providing the utmost in modularity and flexibility, and imaging precision.

There are however, specific applications that demand larger fields-of-view, and the Macro Video Zoom Lens delivers just that...and more:

✚ **Parfocality** – Maintain focus throughout the entire zoom range.

✚ **Longer Working Distances** – View a variety of specimens from 5.5 inches out through infinity.

✚ **Magnification** – With "close-up" lens = 1.0X – 0.066X. Without "close-up" lens = 0.47X – 0.084X

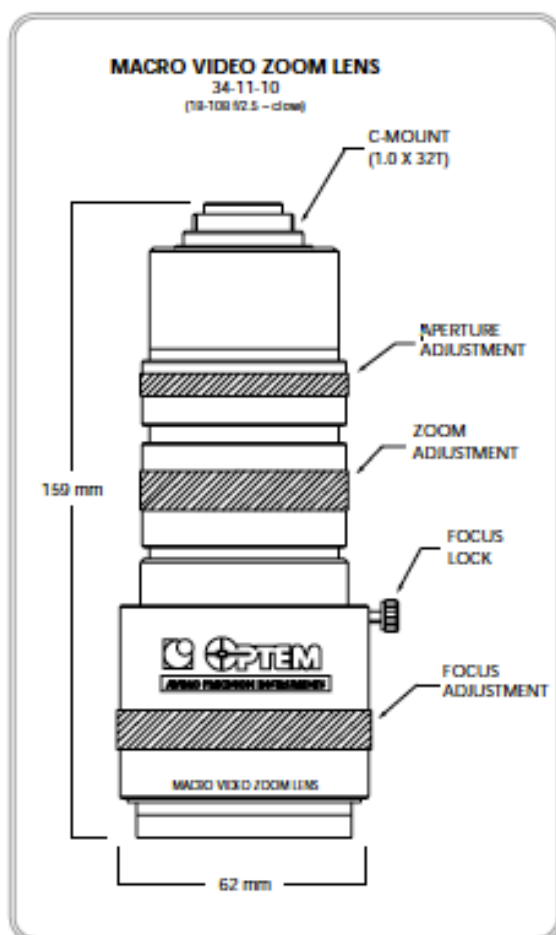
✚ **Compatibility** – Works with virtually all single chip, C-Mount video cameras. 2/3" camera format or smaller recommended.



MACRO VIDEO ZOOM LENS
Catalog No. 34-11-10

MACRO VIDEO ZOOM LENS SPECIFICATIONS

Working Distance	
"close-up" lens.....	5.5" - 11"
w/o "close-up" lens.....	11" - ∞
Focal Length18 - 108 mm	
ApertureF/2.5 - Closed	
Magnification w/close-up lens	
@Max. WD:.....	0.066 - 0.4X
@Min. WD:.....	0.17 - 1.0X
Zoom Ratio6:1 (parfocal)	
FocusExternal, Manual w/ locking screw	
Zoom ControlExternal, Manual	
Video MountC-Mount	
Camera Format2/3" or smaller	
Weight1 lb., 3 oz.	
Length159 mm	
Diameter62 mm maximum	



FIELDS-OF-VIEW (F.O.V.)*

"Close-Up" Lens

Working Distance	F.O.V. (mm) @ Low Mag.	F.O.V. (mm) @ High Mag.
5.5"	38 x 51	6 x 8
7"	60 x 80	10 x 14
8"	72 x 96	12 x 16
9"	83 x 110	14 x 19
10"	90 x 120	16 x 22
11"	100 x 133	17 x 23

Without "Close-Up" Lens

Working Distance	F.O.V. (mm) @ Low Mag.	F.O.V. (mm) @ High Mag.
11"	79 x 105	14 x 19
24"	198 x 264	33 x 44
36"	311 x 415	55 x 73
48"	415 x 553	70 x 93

*Based upon a 2/3" camera format. For 1/2" camera format, multiply F.O.V. x 0.72. For 1/3" camera format multiply F.O.V. x 0.54.

INNOVATIVE OPTICAL SOLUTIONS

Optem International is known worldwide as The Leader In Zoom Technology. Regardless of your optical system requirements, Optem has your solution. We pride ourselves in developing innovative microscope-type optical systems for a variety of applications. Our optical systems are typically used by industrial, medical and semiconductor manufacturers, wherever video microscopy is required.

The next time you find yourself looking for a unique optical solution, contact Optem International and put our optical engineers to work for you.



Changing The Way The World Views Microscopes

78 Schuyler Baldwin Drive
Fairport, NY USA 14450-9196
☎ : 716.223.2372 • ✉ : 716.223.3413

www.OptemIntl.com • Info@OptemIntl.com

341110-4104BWW - 2.5

D- Cámara Dimage A2



DiMAGE A2



E MANUAL DE INSTRUCCIONES

9222-2720-12 SY-A312/0401

Especificaciones técnicas

Número de píxeles efectivos:	8 millones (2568 X 1928).
CCD:	Tipo 2/3 progresivo color primario CCD con un total de 8,3 millones de píxeles.
Sensibilidad de la cámara (ISO):	Automática y equivalentes ISO 64, 100, 200, 400, y 800.
Ratio de aspecto:	4:3.
Construcción del objetivo:	16 elementos en 13 grupos.
Apertura máxima:	f/2,8 (gran angular), f/3,5 (teleobjetivo).
Distancia focal:	7,2 - 50,8 mm. (equivalente 35 mm.: 28 - 200 mm.
Rango de enfoque:	0,5 m. - infinito (1,6 ft. - infinito).
(desde el CCD)	0,25 - 0,6 m. (11,8 - 23,6 in.) en modo macro: teleobjetivo. 0,3 - 0,6 m. (9,8 - 23,6 in.) en modo macro: gran angular.
Diámetro del filtro:	49 mm.
Sistema de enfoque automático:	Video AF.
Obturador:	Obturador electrónico CCD más obturador mecánico
Tiempo de reciclaje del flash incorporado:	5 seg. (aprox.)
Visor LCD:	Visor de 11 mm. (0,44 in.) filtro color tipo VGA color completo
Monitor LCD:	46 mm. (1,8 in.) TFT polisilicona de baja temperatura.
Campo de visión:	Aproximadamente 100%.
Conversión A/D:	14 bits.
Sistema de grabación:	Tarjetas de CompactFlash del Tipo I y II, y Microdrives de IBM de 170MB, 340MB, 512MB, y 1GB.
Formatos de archivos:	JPEG, TIFF, Motion JPEG (mov), WAV y RAW. Compatibilidad con DCF 2.0, DPOF y Exif 2.21.
PRINT Image Matching II:	Si
Idiomas de los menús:	Inglés, Alemán, Francés, Español y Chino.
Salida de AV:	NTSC y PAL.

E- Constancia CIICA 2013



**1^{er} CONGRESO IBEROAMERICANO
DE INSTRUMENTACIÓN
Y CIENCIAS APLICADAS**

SOMI XXVIII CONGRESO DE INSTRUMENTACIÓN

28 al 31 de octubre de 2013

El Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico de la Universidad Nacional Autónoma de México
y la Universidad Autónoma de Campeche

Otorgan la presente

CONSTANCIA

a: Julio Alberto Taque Vázquez, Luis Carlos Álvarez Nuñez,
Alejandro Farah Simon

por haber presentado su trabajo

**SISTEMA DE MEDICIÓN INTERFEROMÉTRICO DE COMPONENTES
OPTOMECÁNICOS Y SU APLICACIÓN EN AMBIENTES CRIOGÉNICOS**

Sn. Francisco de Campeche, Campeche, México, 31 de octubre de 2013


Dr. José Manuel Sanger Blesa
PRESIDENTE DEL COMITÉ ORGANIZADOR

