



## 1. INTRODUCCIÓN

Desde su fundación, el CIO ha venido usando la metrología óptica. En sus primeros años, se empleó para determinar características geométricas de superficies astronómicas (espejos de telescopios), durante el proceso de pulido. La mayoría de las pruebas ópticas de taller implementadas fueron basadas en interferometría clásica.

Posteriormente se empezó a ampliar las aplicaciones de metrología óptica con fines de determinar índices de refracción y campos de temperatura en flamas. El paso de reducir datos a partir de los interferogramas "manualmente" o por conteo de franjas a hacerlo mediante el procesamiento digital, fue de manera natural; pues el CIO se ha caracterizado por mantener en su infraestructura las tecnologías modernas. Así que, el advenimiento de computadoras rápidas, cámaras digitales y tarjetas digitalizadoras, ampliaron aún más las aplicaciones de la metrología óptica y, se empieza a utilizar técnicas basadas en interferometría de moteado (speckle) y holografía digital unidos a láseres pulsados y cámaras rápidas. Estos primeros estudios fueron probados para determinar la topografía de una superficie.

Este reporte marca el inicio de una investigación que se extenderá hasta un periodo aproximado de tres años, el cual abarca un área poca explorada y que conllevará una demanda progresiva de técnicas de prueba con fines de control de calidad, detección de falla y caracterización. Cabe mencionar que no hay mucha información publicada y lo que se encuentra disponible está en otros idiomas como era de esperarse, por lo que resulta excelente contar con un poco más de información extra sobre los temas inmersos en este proyecto.



## 2. JUSTIFICACIÓN

Con este proyecto se pretende ampliar la experiencia que se tiene en el CIO de caracterizar propiedades mecánicas de materiales a escala sub-microscópica. Se estudiarán e implementarán técnicas interferenciales, entre las que destacan los interferómetros basados en los clásicos Michelson y Mirau. Las muestras que se caracterizarán serán metales nano-estructurados y sistemas ópticos integrados (on-chip). En el caso de materiales nano-estructurados las muestras serán proporcionadas por el Grupo de Fotónica del CIO (Dr. Elder de la Rosa). Las muestras de sistemas ópticos integrados serán obtenidas a través del Dr. Daniel May Arrijoja del INAOE.

## 3. OBJETIVOS

- ✚ Se requiere estudiar y asimilar el conocimiento básico de las afecciones introducidas de los materiales a nivel microscópico.
- ✚ Caracterizar mecánicamente nuevos materiales nano-estructurados y sistemas ópticos integrados (on-chip) mediante técnicas microscópicas interferométricas basadas en interferómetros de Michelson y Mirau.
- ✚ Investigar los aspectos geométricos tridimensionales de las muestras on-chip.
- ✚ Procesamiento digital de franjas.
- ✚ Implementación de algoritmos de detección de fase y desenvolvimiento para obtener campos de desplazamiento local que sufre la muestra al ser movida mecánicamente.



## 4. CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA EN QUE PARTICIPÓ

El Laboratorio de Metrología Óptica II se caracteriza por realizar el cálculo de diversas cantidades físicas (temperatura, velocidad, presión, distancia, desplazamiento, esfuerzo, etc.) de objetos y/o regiones de observación. El reconocimiento de patrones también es importante. Para llevar a cabo este objetivo, se usan arreglos ópticos que incluyen dispositivos optoelectrónicos, fuentes de luz y software. Generalmente, se capturan imágenes del objeto bajo estudio y éstas a su vez son procesadas para recuperar en forma cuantitativa la información de interés.

Los campos en los que se lleva a cabo investigación en el laboratorio son pruebas no destructivas, inspección de procesos, control y automatización, perfilometría, reconocimiento de patrones, análisis de deformación, detección de fractura, calibración, visión por computadora, análisis de vibraciones, etc. Estos campos implican el uso combinado de técnicas experimentales y numéricas.

El laboratorio tiene un principal enfoque en las **Pruebas no destructivas**, que detectan cambios físicos en un objeto o región de observación se realiza sin contacto físico ya sea en forma de campo completo o puntualmente. Para ello, el objeto bajo prueba es iluminado con luz blanca o láser. La luz reflejada por el objeto es capturada ya sea mediante sensores CCD (métodos de campo completo) o mediante fotodetectores (métodos puntuales). Por medio de este tipo de pruebas se puede medir rugosidad, forma, deformación, desplazamiento y distancia en el rango que va de unos pocos nanómetros hasta unos pocos centímetros.

La tendencia actual en el departamento es el estudio de eventos dinámicos, tales como el análisis del desarrollo de fracturas, deformación por carga térmica, medición de forma de objetos en movimiento, etc. Para esto, se usan diferentes técnicas ópticas:

Interferometría electrónica de patrones de moteado (ESPI), holografía digital, técnicas de moiré, fotografía de moteado, interferometría heterodina, schlieren y velocimetría de partículas (PIV).<sup>[1]</sup>



Para realizar todo lo mencionado actualmente, el laboratorio de Metrología II del CIO, que es donde se llevarán a cabo los experimentos del presente proyecto, cuenta con una infraestructura moderna con suficiente espacio para construir los prototipos de microscopios interferométricos. A continuación se enlista el equipo mayor:

- ✚ 2 mesas (holográficas) antivibratorias. De superficie suficiente para colocar los prototipos de laboratorio.
- ✚ 1 Láser He-Cd, de 100mW, violeta. Adecuado para grabado litográfico de elementos micro-ópticos en fotorresistencia.
- ✚ 1 Spinner (construido por nosotros) para impregnado de capas de fotorresistores de diferentes grosores.
- ✚ 1 Sistema de filtro laminar. En el cuarto oscuro para construcción de capas de fotorresistencia.
- ✚ 1 Cámara CCD COHU
- ✚ 1 Cámara rápida CMOS
- ✚ 2 PC's para procesamiento digital de imágenes.
- ✚ 1 Tarjeta digitalizadora Meteor II
- ✚ Lentes y monturas ópticas varias.

Adicionalmente, en el CIO se cuenta con taller óptico, mecánico y de electrónica que se puede utilizar para apoyar el proyecto.

Finalmente, el CIO posee una biblioteca que tiene más de 6,000 libros y esta suscrita a más de 100 revistas periódicas versadas en temas especializados de óptica.

## **5. PROBLEMAS A RESOLVER**

La aplicación de esta residencia está dirigida para poder solucionar el primer paso en la investigación de nuevas técnicas microscópicas interferométricas que en este caso fueron basados en los interferómetros Michelson y Mirau, para poder con esto conocer de los



materiales nano-estructurados y de las muestras on-chip sus aspectos geométricos tridimensionales, y posteriormente sus propiedades elásticas, para poder realizar simulaciones de su comportamiento mecánico con Métodos de Elementos Finitos.

## 6. ALCANCES Y LIMITACIONES

Dentro de los alcances se da a resaltar los estudios de factibilidad de uso de técnicas interferométricas para caracterización de materiales, cuyas muestras son de tamaño sub-micras permitirá ampliar las metodologías existentes de una manera considerable. Cabe resaltar que las técnicas que se estudiarán en este proyecto serán aplicadas en sistemas contruidos con materiales nano-estructurados, en control e inspección en la industria de los microcircuitos y los MEMS. Esto dará como resultado que en Guanajuato se tenga capacidades para iniciar la construcción de infraestructura física y humana en temas tan importantes como lo es la nanotecnología y, mantenerse como un estado de vanguardia en investigación y desarrollo en programas de actualidad. La recientemente creada Red de Nanotecnología se verá beneficiada al mantener proyectos de gran envergadura que pueda competir con homólogos nacionales e internacionales.

Es importante notar la gran interdisciplinaridad que tiene el presente proyecto. Lo cual permite persuadir a estudiantes de diferentes carreras universitarias (física, matemáticas, mecánica, electrónica, química, sistemas, etc.) a continuar estudios de postgrado en el CIO, ya sea en los programas tradicionales de óptica o en el recientemente abierto programa de maestría en Optomecatrónica. En este aspecto, se apoyará a la Dirección de Formación académica del CIO y al CONCYTEG en la promoción en todos los niveles de la educación para despertar el interés por la ciencia en la región.

Cabe mencionar que el CIO nos otorgo una beca mensual de \$ 1000.00 mensuales, para el transcurso de estos 4 meses y medio que duro la residencia. Solo se llevo al punto en el

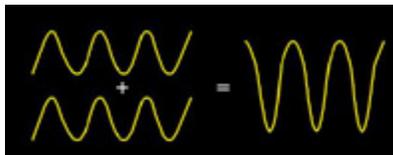
que se hizo el análisis tridimensional de los escalones nano-estructurados y del micro circuito. Esto fue por motivo de que se pudo satisfacer las necesidades primarias de este proyecto de 3 años, mencionando con esto que hubo una invitación formal para continuar si así se deseaba, remarcando que el proyecto está financiado por el CONACYTEG.

## 7. FUNDAMENTO TEÓRICO

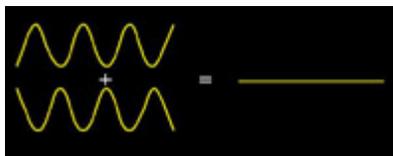
### 7.1. CONCEPTOS

**Interferencia:** La suma de dos ondas puede dar un resultado distinto, dependiendo de la fase de las dos ondas. Dos ondas están en fase si las crestas y valles de las ondas están en la misma posición al mismo tiempo.

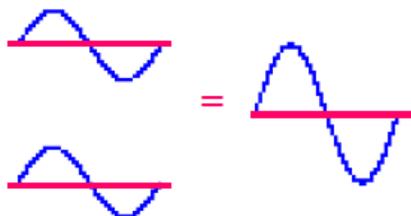
**Interferencia Constructiva:** Ondas en fase producen una onda dos veces más grande.



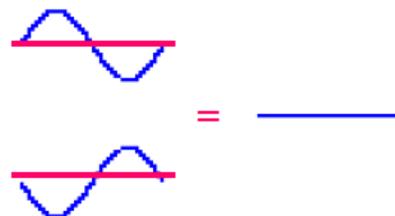
**Interferencia Destructiva:** Ondas completamente fuera de fase se anulan y la suma es cero.



Consideremos la superposición de dos ondas armónicas de idéntica frecuencia y amplitud, pero desfasadas entre sí una cantidad  $\phi$ .



$$\phi = 0 \quad \text{o} \quad 2m\pi$$



$$\phi = \pi \quad \text{o} \quad (2m-1)\pi$$



La diferencia de fase entre las ondas armónicas puede ser debida simplemente a que han recorrido distancias distintas, por lo cual, dependiendo del lugar del espacio en donde se analiza la superposición, es posible hallar interferencia constructiva o destructiva.

En fenómenos luminosos, lo anterior se manifiesta como la aparición de zonas en el espacio iluminadas y oscuras (patrones de franjas claras y oscuras).

**Interferómetros:** Los interferómetros son dispositivos diseñados para producir interferencias y encuentran múltiples aplicaciones científicas y técnicas.

## 7.2. CONDICIONES DE INTERFERENCIA

El principio de superposición que se aplica a todas las ondas conduce al fenómeno de **interferencia** de las ondas electromagnéticas, vamos a deducir las condiciones necesarias para que las interferencias se produzcan y sean observables.

Antes de proceder al cálculo, y para hacerlo más sencillo, vamos a enunciar algunas consideraciones sobre la polarización que han de tener las dos ondas que interfieren. Supongamos, inicialmente, que superponemos dos ondas de la misma frecuencia con polarizaciones lineales ortogonales entre sí, si superponemos los campos:

$$\begin{aligned} E_x &= E_{x0} \cos \omega t \\ E_y &= E_{y0} \cos(\omega t + \phi) \end{aligned} \quad \dots \text{Ecuaciones 7.2.1.}$$

lo que obtenemos es el campo: ( $\hat{x}$ ,  $\hat{y}$  son vectores unitarios en la dirección de los ejes)

$$\vec{E} = E_x \hat{x} + E_y \hat{y} \quad \dots \text{Ecuación 7.2.2.}$$

que es una radiación con polarización elíptica. Es decir, la suma de ondas polarizadas ortogonalmente entre sí no da lugar a interferencias. Así pues, concluimos que para tener



interferencias es necesario que las polarizaciones de las ondas no sean ortogonales.

Aunque esto no implica que las polarizaciones de ambas ondas hayan de ser iguales para tener interferencias (por ejemplo, las interferencias entre dos ondas una P0° y la otra P45° no es nula), sí es ésta la condición para que las interferencias sean óptimas. Así pues, de ahora en adelante, consideraremos la superposición de ondas con la misma polarización.

Esto implica que podemos olvidar el carácter vectorial de las ondas en lo que sigue.

Procedemos, por tanto, a calcular la intensidad resultante de la suma de los campos  $E_1$  y  $E_2$ :

$$\left. \begin{aligned} E_1 &= E_{10} \cos(\omega_1 t + \phi_1) \\ E_2 &= E_{20} \cos(\omega_2 t + \phi_2) \end{aligned} \right\} \dots \text{Ecuaciones 7.2.3.}$$

La intensidad de una onda electromagnética es proporcional al cuadrado de la amplitud (tomaremos, arbitrariamente, esa constante como la unidad). Por tanto, la intensidad del campo resultante es:

$$E^2(t) = [E_1(t) + E_2(t)]^2 = E_{10}^2 \cos^2(\omega_1 t + \phi_1) + E_{20}^2 \cos^2(\omega_2 t + \phi_2) + 2E_{10}E_{20} \cos(\omega_1 t + \phi_1) \cos(\omega_2 t + \phi_2) \dots \text{Ecuación 7.2.4.}$$

que puede escribirse:

$$E^2(t) = E_{10}^2 \cos^2(\omega_1 t + \phi_1) + E_{20}^2 \cos^2(\omega_2 t + \phi_2) + E_{10}E_{20} \cos[(\omega_1 + \omega_2)t + \phi_1 + \phi_2] + E_{10}E_{20} \cos[(\omega_1 - \omega_2)t + \phi_1 - \phi_2] \dots \text{Ecuación 7.2.5.}$$

Pero para calcular la energía que realmente detectaría un detector, hemos de tener en cuenta que éste no es capaz de medir  $I(t)$  ya que esta función oscila muy deprisa en el tiempo (el valor de las frecuencias ópticas es del orden de  $10^{14}$  a  $10^{15}$ Hz), mientras que los detectores ópticos sólo pueden detectar frecuencias máximas del orden de  $10^9$ Hz (el ojo humano detecta frecuencias del orden de 10Hz). Esto significa que durante el tiempo que



el detector acumula energía antes de reaccionar la radiación luminosa ha oscilado, en el mejor de los casos, un millón de veces. Así pues, hemos de hacer un promedio temporal de  $I(t)$  para obtener lo que realmente puede medirse. Así, la intensidad detectada es el valor medio:

$$I = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} E^2(t) dt$$

... Ecuación 7.2.6.

Donde  $\tau$  es el tiempo de respuesta del detector. Al sustituir  $I(t)$  aparecen las integrales:

$$I_1(t) = \frac{E_{10}^2}{\tau} \int_0^{\tau} \cos^2(\omega_1 t + \phi_1) dt = E_{10}^2 \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{\text{sen}(2\omega_1 \tau + 2\phi_1) - \text{sen}2\phi_1}{2\omega_1 \tau} \right) \approx \frac{1}{2} E_{10}^2$$

$$I_2(t) = \frac{E_{20}^2}{\tau} \int_0^{\tau} \cos^2(\omega_2 t + \phi_2) dt = E_{20}^2 \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{\text{sen}(2\omega_2 \tau + 2\phi_2) - \text{sen}2\phi_2}{2\omega_2 \tau} \right) \approx \frac{1}{2} E_{20}^2$$

$$\frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} \cos[(\omega_1 + \omega_2)t + \phi_1 + \phi_2] dt = \frac{\text{sen}[(\omega_1 + \omega_2)\tau + \phi_1 + \phi_2] - \text{sen}(\phi_1 + \phi_2)}{(\omega_1 + \omega_2)\tau} \approx 0$$

...Ecuaciones 7.2.7.

y además:

$$\frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} \cos[(\omega_1 - \omega_2)t + \phi_1 - \phi_2] dt = \frac{\text{sen}[(\omega_1 - \omega_2)\tau + \phi_1 - \phi_2] - \text{sen}(\phi_1 - \phi_2)}{(\omega_1 - \omega_2)\tau}$$

...Ecuación 7.2.8.

Tenemos por tanto que:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \frac{\text{sen}[(\omega_1 - \omega_2)\tau + \phi_1 - \phi_2] - \text{sen}(\phi_1 - \phi_2)}{(\omega_1 - \omega_2)\tau}$$

...Ecuación 7.2.9.

donde se ha hecho uso de  $E_i^2 = 2I_i$ .



Vemos en esta expresión que la intensidad de la superposición de las dos ondas es la suma de intensidades más un término interferencial. Ahora bien, nótese que para que este término interferencial no sea nulo (o prácticamente nulo) es necesario que  $(\omega_1 - \omega_2) \tau$  sea una cantidad pequeña. En la práctica, dados los enormes valores de las frecuencias ópticas, esto se traduce en que  $(\omega_1 - \omega_2) = 0$  ó muy próximo a cero. Por tanto, para observar interferencias con luz es necesario que las dos ondas que interfieren tengan la misma frecuencia. En este caso, la expresión anterior queda:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\Delta\phi) \quad \dots \text{Ecuación 7.2.10.}$$

donde  $\Delta\phi = (\phi_1 - \phi_2)$  es el desfase existente entre las dos ondas. Si  $\vec{r}$  es el vector de posición en el campo de observación:

$$I(\vec{r}) = I_1(\vec{r}) + I_2(\vec{r}) + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \Delta\phi(\vec{r}) \quad \dots \text{Ecuación 7.2.11.}$$

$$\Delta\phi = \phi_2 - \phi_1 = \vec{k}_2 \cdot \vec{r}_2 - \vec{k}_1 \cdot \vec{r}_1 \quad \dots \text{Ecuación 7.2.12.}$$

$$|\vec{k}_2| = \frac{2\pi}{\lambda_2} \quad y \quad |\vec{k}_1| = \frac{2\pi}{\lambda_1} \quad \dots \text{Ecuaciones 7.2.13.}$$

donde:

$I_1(\vec{r}) + I_2(\vec{r}) \implies$  Es un término constante que representa el fondo (ruido).

$2\sqrt{I_1 I_2} \cos \Delta\phi(\vec{r}) \implies$  Es un término variable que representa la amplitud (señal).

Así, con lo ya mencionado podemos llegar al modelo general del patrón de franjas, que es el siguiente:



$$I(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos \Delta\phi(x, y) \quad \dots \text{Ecuación 7.2.14.}$$

donde:

$$a(x, y) = I_1(x, y) + I_2(x, y) \quad y \quad b(x, y) = 2\sqrt{I_1(x, y)I_2(x, y)}$$

A partir de esta expresión vemos que el valor de la intensidad depende del valor del desfase entre las dos ondas, de forma que  $I$  está comprendida entre un valor máximo y un valor mínimo dados por:

$$\begin{aligned} I_{\max} &= I(\Delta\phi = 2m\pi) = (\sqrt{I_1} + \sqrt{I_2})^2 \\ I_{\min} &= I(\Delta\phi = 2(m+1)\pi) = (\sqrt{I_1} - \sqrt{I_2})^2 \end{aligned} \quad \dots \text{Ecuación 7.2.15.}$$

Se define la **visibilidad  $V$**  de las interferencias como:

$$V = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad \dots \text{Ecuación 7.2.16.}$$

que es una cantidad comprendida entre 0 y 1. Si sustituimos el valor obtenido para las intensidades máxima y mínima tenemos:

$$V(r) = \frac{2\sqrt{I_1(r)I_2(r)}}{I_1(r) + I_2(r)} \equiv \frac{b(r)}{a(r)} \quad \dots \text{Ecuación 7.2.17.}$$

La visibilidad mide la calidad de las interferencias: si vale 1 es porque los mínimos de intensidad tienen intensidad nula (con lo que los máximos resaltan en mayor grado) y si vale cero es porque las intensidades máxima y mínima son iguales (con lo que no hay interferencias). Pues bien, la expresión anterior muestra que la condición óptima para observar interferencias con buena visibilidad es que  $I_1 = I_2$ .



Así pues, podemos resumir las **condiciones de interferencia** diciendo que para que ésta sea observable con alta visibilidad es necesario que:

- Ⓜ Las polarizaciones de ambas ondas sean iguales.
- Ⓜ Las frecuencias de ambas ondas sean iguales.
- Ⓜ Las amplitudes de ambas ondas sean iguales.
- Ⓜ La diferencia de fase permanezca constante en el tiempo (**coherencia**).

Nótese que aún no cumpliéndose estrictamente estas condiciones, pueden todavía observarse interferencias pero serán de baja calidad (poca visibilidad).

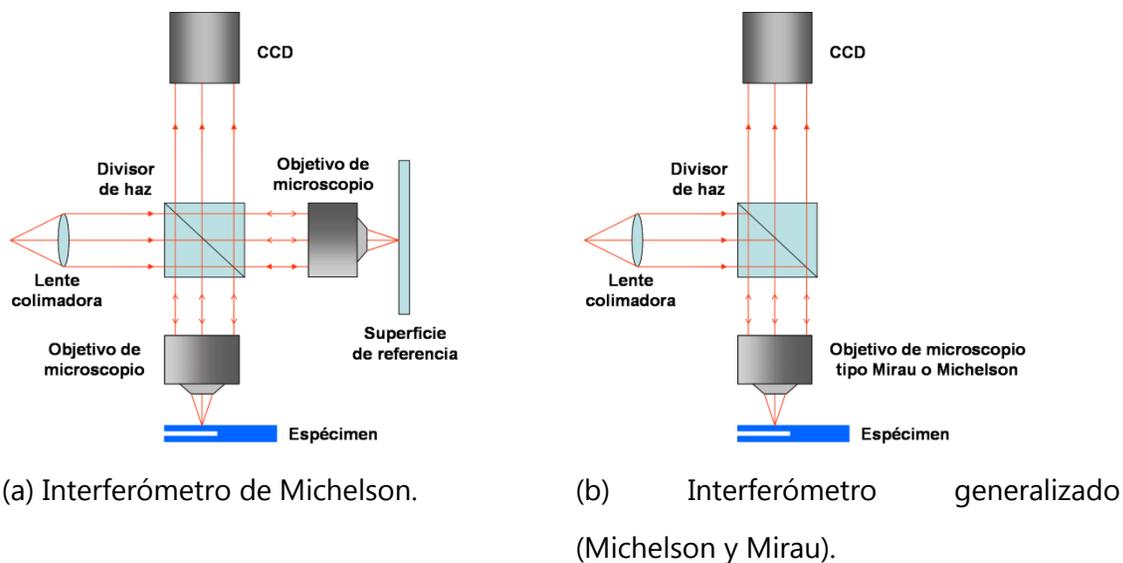
Pasemos ahora a ver cómo se puede conseguir llevar a cabo experimentalmente la superposición de ondas que hemos descrito en este apartado. Existen dos formas: división de amplitud y división del frente de ondas. <sup>[2][3]</sup>

### 7.3. MICROSCOPIA INTERFERENCIAL Y SISTEMAS INTERFEROMÉTRICOS

La microscopía interferencial es una técnica de no contacto para la caracterización física de muestras micrométricas. Dependiendo del tipo de muestras, de amplitud (opacos) o de fase (transparentes), los sistemas interferenciales pueden manipularse para trabajar en reflexión o transmisión. Adicionalmente los objetos opacos pueden tener terminados cuyas superficies pueden ser rugosas o especulares (pulidas tipo espejo). Con estas técnicas es posible medir superficies en tres dimensiones y determinar sus desplazamientos locales al someterse a cargas mecánicas estáticas o dinámicas.

Todos los sistemas interferométricos disponen de un divisor de haz que envía una parte de la luz a la superficie de la muestra y otra parte a una superficie de referencia, ver la figura 7.3.1 inciso a). La luz reflejada de estas dos superficies se recombina formando franjas de interferencia que se capturan a través de una cámara CCD. Para cada punto de la superficie existe una distancia del objetivo a la muestra que proporciona el lugar geométrico de los puntos de igual fase en la imagen del interferograma. Este interferograma se interpreta

como curvas de nivel que corresponden a la topografía de la superficie. Otro esquema de trabajo es comparar un interferograma (de referencia) cuando el objeto esta en reposo y otro al someter a una carga mecánica el objeto. Como resultado de la correlación de las imágenes de franjas se obtiene un patrón de franjas también, que corresponde a contornos de igual desplazamiento. Así, mediante el análisis de los interferogramas se puede determinar la magnitud física que afecta el desplazamiento local en la superficie del objeto espécimen. Con estos datos se calculan algunas de las características mecánicas de los materiales que constituyen al espécimen.



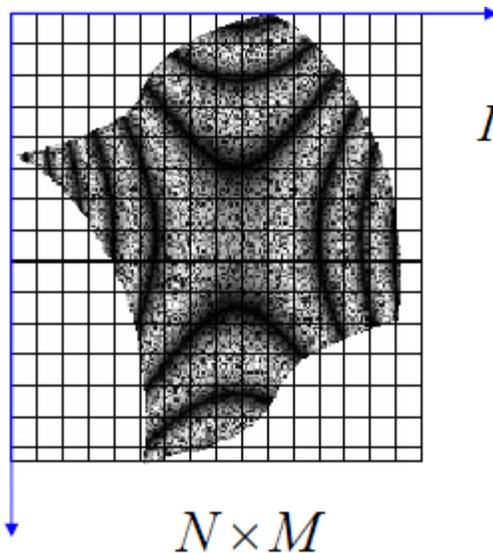
**Figura 7.3.1.**

El arreglo óptico general que se construirá para caracterizar las muestras se muestra esquematizado en la Fig. 7.3.1 inciso b). La figura 7.3.1 inciso b) señala el arreglo generalizado para dos interferómetros, cuyo sistema óptico del objetivo de microscopio es la diferencia. Mediante el apoyo económico de este proyecto se pretenden adquirir dos objetivos de microscopio interferenciales (Nikon, Catálogo Edmund), uno tipo Michelson y otro Mirau.

La razón de tener dos esquemas de sensores interferométricos estriba en que el de tipo Michelson nos servirá para caracterizar muestras en reflexión y el de Mirau en transmisión. Este último es muy útil para determinar grosores de muestras transparentes.

#### 7.4. PHASE-SHIFTING

Para comenzar la discretización (digitalización) del modelo es:



$$I(i, j) = a(i, j) + b(i, j) \cos[\phi(i, j)]$$

$$i:1, \dots, N; \quad j:1 \dots M$$

Donde se realiza un enmallado de la imagen para poder obtener los valores por pixel, basándonos en la ecuación 7.2.14.

La cuantización de la imagen normalmente se hace en 256 niveles de gris, por tanto cada punto tiene el siguiente contador:  $(i, j): 0, \dots, 255$  donde 0 será el negro y 255 será el blanco.

Así entonces, basados en el comportamiento del interferograma producido por una fuente monocromática según la ecuación 7.2.14, al ser la envolvente constante se puede codificar la topografía de una superficie en la diferencia de fase óptica entre los puntos. Esta técnica se realiza iluminando la muestra con una fuente monocromática de longitud central  $\lambda_0$  y tomando una serie de  $n$  registros a medida que se introduce un factor de fase conocido igual a  $2\pi/n$ , al variar la diferencia de camino óptico. Empleando relaciones trigonométricas se halla la diferencia de fase donde está contenida la información topográfica de la muestra.



La técnica más utilizada para el desarrollo de este método es el realizado para  $n$  igual a cuatro imágenes, las cuales se van registrando a medida que se introduce una diferencia de camino en  $\lambda_0 / 2$ . Obteniendo imágenes cuya intensidad esta dada por.

$$\begin{aligned} I_0(x, y) &= I_R + I_M + 2(I_R I_M)^{1/2} \cos(\phi(x, y)) \\ I_1(x, y) &= I_R + I_M + 2(I_R I_M)^{1/2} \cos(\phi(x, y) + \pi / 2) \\ I_2(x, y) &= I_R + I_M + 2(I_R I_M)^{1/2} \cos(\phi(x, y) + \pi) \\ I_3(x, y) &= I_R + I_M + 2(I_R I_M)^{1/2} \cos(\phi(x, y) + 3\pi / 2) \end{aligned} \quad \dots \text{Ecuación 7.4.1.}$$

La fase  $\phi$  se puede calcular realizando la siguiente operación entre las imágenes.

$$\phi(x, y) = \tan^{-1} \left( \frac{I_1(x, y) - I_3(x, y)}{I_0(x, y) - I_2(x, y)} \right) \quad \dots \text{Ecuación 7.4.2.}$$

Para esta técnica se observa que al hallar la fase, el valor del arco tangente sólo toma valores entre  $-\pi$  y  $\pi$ , mostrando una fase discontinua. Para eliminar esta discontinuidad es necesario realizar una corrección de fase conocida como "unwrapping" ó "desenvolvimiento", que es una función manejada por MATLAB lo que hace más rápido el procesamiento de las imágenes. Además presenta una desventaja debido a la ambigüedad en la determinación de variaciones de fase mayores de  $2\pi$  entre puntos consecutivos, por lo que por muchas de las veces se le aplica algún tipo de filtro ó se corrige directamente sobre las imperfecciones que presenta una determinada imagen.

## 7.5. DETECCIÓN DE MÁXIMOS

En esta técnica se aprovecha la propiedad de un interferograma producido por una fuente policromática, según la ecuación 7.2.14, las franjas se encuentran moduladas por una envolvente  $b(x, y)$  presentando un máximo de intensidad cuando la diferencia de camino óptico es cero. De una manera análoga al confocal, el problema radica en localizar la posición de máxima intensidad del interferograma para todos los puntos de la muestra, desplazando en dirección Z uno de los brazos del interferómetro. En este método se busca que el desplazamiento "Z" realizado por un mecanismo Piezoeléctrico sea tal que la franja



brillante del interferograma recorra todos los puntos de la muestra, almacenando estas posiciones.

Para esta técnica se observa que el movimiento del Piezo, para que todos los puntos de la muestra pasen por el contacto óptico, debe de ser del orden del rango de alturas de la muestra, introduciendo la no-linealidad del Piezo, y además del ruido sistemático.<sup>[4]</sup>

## 8. PROCEDIMIENTO Y DESCRIPCIÓN DE LAS ACTIVIDADES REALIZADAS

### 8.1. MES DE AGOSTO

A lo largo del mes de agosto estuve haciendo una revisión bibliográfica óptica en general y microscopia interferencial en particular. Esto en virtud de que no contaba con conocimientos a fondo sobre estos temas. Además investigué los temas ya mencionados a través del internet y algunos libros <sup>[5] [6]</sup>.

Para reafirmar lo anterior el Dr. Ramón Rodríguez Vera nos impartió cuatro clases que comenzaban a las 9:00 h y finalizaban a las 12:00 h.

Aunado a esto, realice programas en MATLAB los cuales son un preámbulo de lo que queremos llegar a hacer en el laboratorio. Estos serán indispensables para el cálculo y simulación de franjas de interferencia. Para llevar a cabo esta acción me apoye en manuales y libros de MATLAB para una optimización de los programas <sup>[5] [6] [7] [8] [9]</sup>.

Para visualizar mejor lo realizado con los programas, los agrego en el **Anexo 1** y **Anexo 2** del apartado de **Resultados**, los cuales ya son funcionales y fueron presentados al Dr. Rodríguez Vera.

## 8.2. MES DE SEPTIEMBRE

Durante este mes nos dedicamos al Diseño y Construcción del Prototipo, que en este caso se trata del “Arreglo Interferométrico Tipo Mirau”, el cual cuenta con la particularidad de trabajar con luz incoherente (luz blanca) y luz coherente (luz láser). Nosotros lo trabajamos con luz coherente. Utilizamos los principios de la interferometría para que con ayuda de diversos aparatos capaces de realizar medidas de fase y amplitud, pudiésemos construir en nuestro laboratorio de Metrología II un microscopio interferométrico por reflexión el cual, aprovechando la interferencia con luz, nos permitiese realizar medidas de superficies con resolución axial del orden de nanómetros. Para lograr esta resolución se montó sobre el objetivo interferométrico un sistema de traslación sobre el eje axial, que permite realizar desplazamientos del orden de los nanómetros, por medio de un piezoeléctrico y un control digital de desplazamiento.

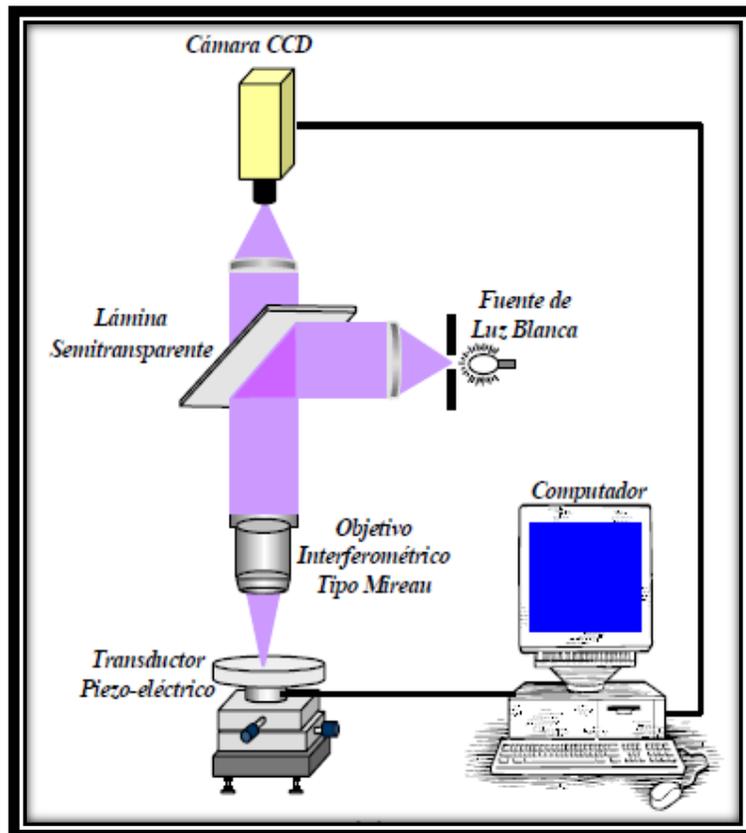


Figura 8.2.1. Dispositivo Experimental

Como se muestra en el diagrama de la figura 8.2.1.

Se tiene que mencionar que el objetivo de interferencia Mirau es un objetivo de aumento de la interferencia comparativamente alta (10x, 20x o 40x) utilizada en los instrumentos producidos por la Corporación Nikon. El principio del dispositivo, como se ilustra en la Figura 8.2.2, se basa en colocar un espejo de reflexión en el centro de la lente del objetivo, y la interposición de un espejo a la mitad entre el objetivo y la muestra. Estos

componentes están dispuestos de modo que un patrón de interferencia aparecerá si el sistema se centra en la muestra.<sup>[10]</sup>

Para armar el prototipo se siguieron las instrucciones del Ing. Juan Antonio Rayas Alvares encargado del Laboratorio de Metrología II, el cual

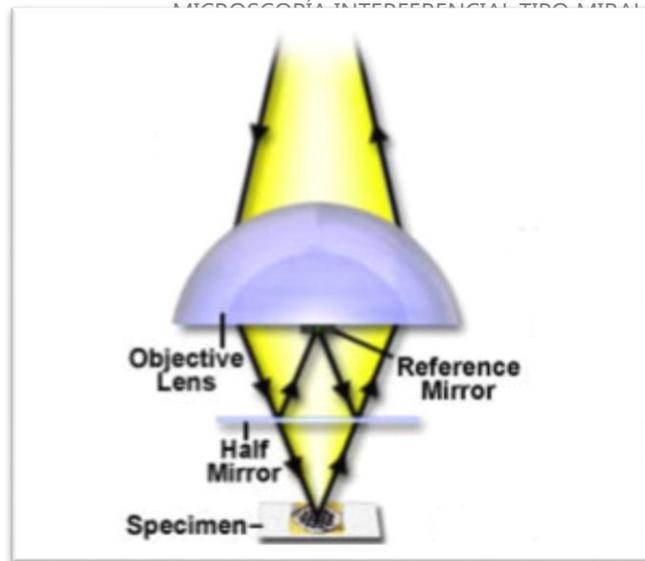


Figura 8.2.2. Objetivo Interferencial Mirau.

nos ayudó y guió en este proceso. Se trabajó sobre mesas neumáticas, las cuales evitan lo mayor posible que

las lecturas sean erradas, ya que trabajamos con mediciones del orden de nanómetros; aquí se nos abrió un espacio para montar nuestro arreglo. Para la construcción se utilizaron materiales del laboratorio de Metrología II, especificados en el **Anexo 3** en el apartado de **Resultados**, y el procedimiento fue el siguiente:

1.- Para comenzar se fijó el Láser sobre un extremo de la mesa y se utilizó el diafragma para alinearlos sobre esta, ya que la luz del láser debía ser en todo momento paralelo a la mesa y seguir una línea recta para lo cual se tomó de referencia los agujeros de la mesa y el agujero del diafragma por el cual se hizo pasar el haz de luz.

2.- Posteriormente se colocó el Filtro Espacial frente al láser, montando sobre este su Objetivo Interferométrico, el cual se alineó para que el reflejo que producía se direccionara por el camino del haz; y el Pinhole a una distancia cualquiera pero cuidando siempre la alineación sobre la mesa, en este punto se manejó al Pinhole para que el haz de luz pasara por él de tal forma que se aprovechara al máximo la intensidad del láser, esto con ayuda de unos tornillos micrométricos que tiene el Filtro Espacial.



3.- Teniendo ajustado lo anterior se dispuso a poner el Colimador de Haz de Luz, el cual se coloco a una distancia aproximada de 15 cm del objetivo del filtro espacial, esto con el fin de que el haz de luz se mantuviera del mismo tamaño y con la misma intensidad, manteniendo la alineación del arreglo sobre la mesa. En este punto también se empleo el diafragma para direccionar el reflejo que el colimador producía hacia el camino del haz de luz.

4.- Se dispuso a colocar el Cubo Divisor de Haz, y con ayuda de los tornillos con que cuenta la montura mecánica sobre la que se coloco, se ajusto para que su reflexión fuera en las direcciones correctas, en este paso también nos apoyamos en el diafragma para la alineación.

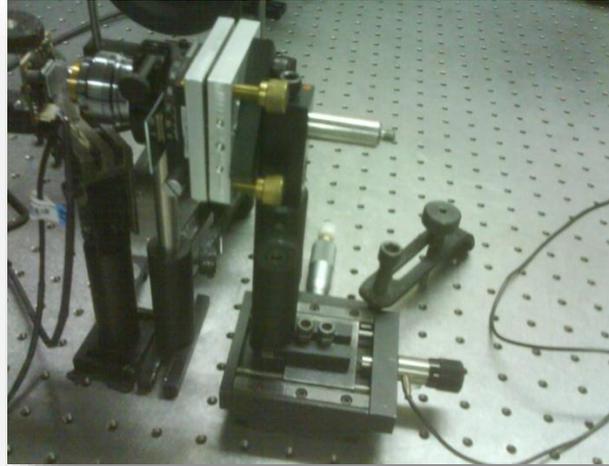
5.- Para continuar, se coloco el Objetivo de Microscopio Interferencial tipo Mirau a un costado del cubo divisor, tratando de que este quedase lo más cerca posible al cubo y que la luz dividida por el cubo llegue específicamente al centro de la lente del objetivo, tratando que la reflexión producida por parte de este sea direccionada hacia el mismo camino por donde llega el láser.

6.- Así también del lado contrario al Objetivo de Microscopio Interferencial tipo Mirau se coloco una Cámara CCD con la cual se observarían los resultados mostrándolos en vivo mediante una computadora de escritorio y programas especializados en esto (nos apoyamos en LABVIEW y MADCAD), quedándonos con esto el cubito en medio de la cámara y del Objetivo de Microscopio Interferencial tipo Mirau.

7.- Luego se coloco un objeto de plástico para ver si se podían obtener franjas de interferencia de buena calidad, esto detrás del Objetivo de Microscopio Interferencial tipo Mirau. Lo anterior no funciono bien y se cambio por un espejo, con este si se obtuvieron franjas mucho mejores por lo que se monto sobre un piezoeléctrico y se tomaron algunos imágenes y datos (ver **Anexo 4** en el aparatado de **Resultados**), en este paso se hizo uso



del atenuador, para bajar la intensidad de luz del láser. Una vez hecho lo anterior se dispuso a montar el escalón de 1 micrómetro, que es el que realmente nos interesa estudiar; para este se tuvo que montar sobre dos piezoeléctricos lo que nos dio dos direcciones de movimiento, cabe señalar que solo un piezoeléctrico

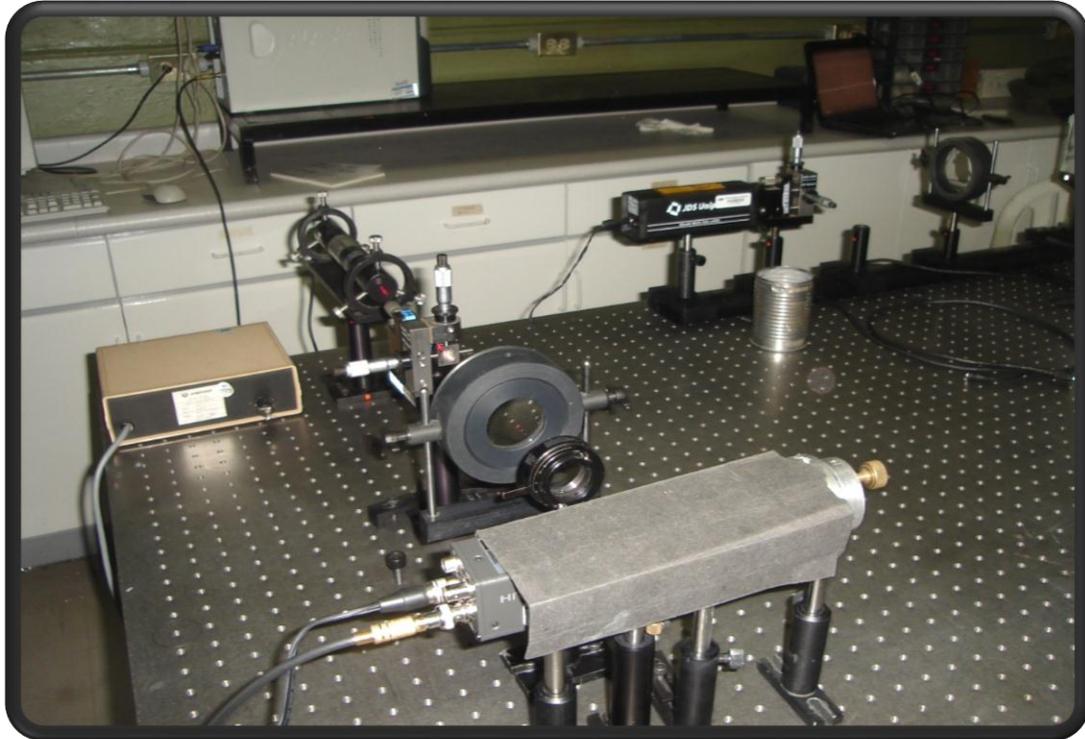


**Figura 8.2.3.**

se controla por medio del Controlador de Piezoeléctrico de canal simple para la realización del corrimiento de fase (Phase-Shifting). Aunado a esto la montura mecánica sobre la que se monto nos permitía girar e inclinar el escalón (ver Figura 8.2.3), todo esto fue por motivo de que no se obtenían franjas de interferencia de buena calidad al mismo tiempo de que se enfocaba el escalón. De hecho lo anterior no se logró mejorar en gran medida.

8.- Para finalizar se quiso mejorar el enfoque del escalón y la calidad de las franjas al mismo tiempo, realizando muchos cambios como: el reordenamiento de la alineación del haz del láser, se cambió la emisión de luz láser por la de luz blanca de un proyector, el cambio de la Cámara CCD por otra que nos permitía acercarnos más al divisor de haz y el cambio del cubo divisor por otro plano que nos ahorra espacio entre la cámara CCD y el Objetivo de Microscopio Interferencial tipo Mirau.

Nota: Para asegurar el arreglo todas las partes fueron colocadas en monturas mecánicas, las cuales fueron aseguradas con tornillos, tuercas, rondanas, cuñas, etc., a la mesa neumática. Para el ajuste de todas las monturas y tornillos, se usó herramienta del laboratorio, tales como: Llaves Allen, Desarmadores, Cúter, pinzas, etcétera.



**Figura 8.2.4.** Arreglo Mirau armado. Del fondo hacia el frente tenemos a el laser, filtro espacial (con pinhole y objetivo interferométrico), colimador de haz de luz, el diafragma, el divisor de haz, La cámara CCD , el Objetivo de Microscopio Interferencial tipo Mirau y el objeto de plástico (que era el que se probaba en ese momento). Estos tres últimos están cubiertos por una cartulina, la cual se colocó para poder evitar al máximo posible la entrada de otras luces que no fueran del laser.

Terminado lo anterior, nos dispusimos a obtener datos e imágenes que considerábamos importantes ó más significativas para el análisis de nuestros resultados y que son mostrados en el **Anexo 4** en el apartado de **Resultados**, en este anexo también se muestran las imágenes del corrimiento de fase y su mejoría con respecto al tiempo.

Para complementar lo anterior se realizaron programas en MATLAB con los cuales poder leer, graficar y comparar los datos obtenidos por programas hechos en LABVIEW, los cuales calculan el voltaje necesario para el phase-shifting y la desenvuelta de las imágenes obtenidas guardando los datos y mostrándolos en una gráfica. Además se realizaron programas de filtraje con Serie de Fourier y un Promediador (average, que trae como una de sus funciones MATLAB). En algunos casos, como en el filtraje con serie de Fourier, se tuvieron que aplicar mascarar para quitar información no deseada las cuales erraban nuestros resultados [11] [12] [13] [14] [15] [16] [17]. Los programas realizados en MATLAB se podrán apreciar en el **Anexo 5** en el apartado de **Resultados**, y se apreciarán los resultados que estos arrojan en el **Anexo 6**.

### 8.3. MES DE OCTUBRE

Para el mes de Octubre se realizó casi lo mismo que en el mes anterior, con la diferencia de que ahora se trabajó con el Objetivo de Microscopio Interferométrico tipo Michelson.

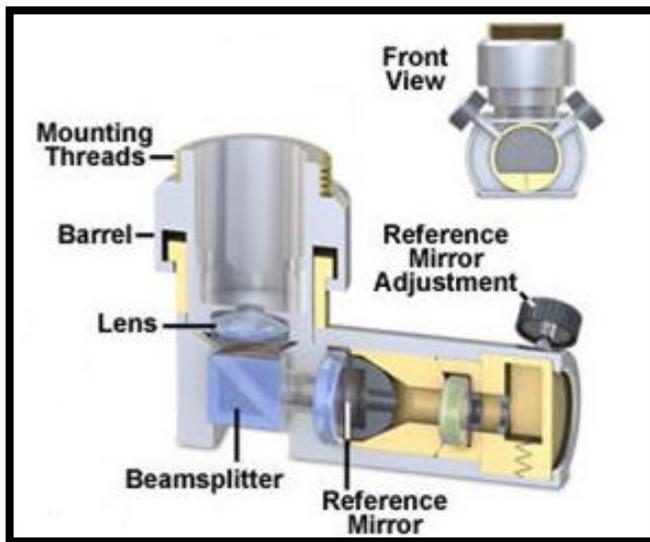


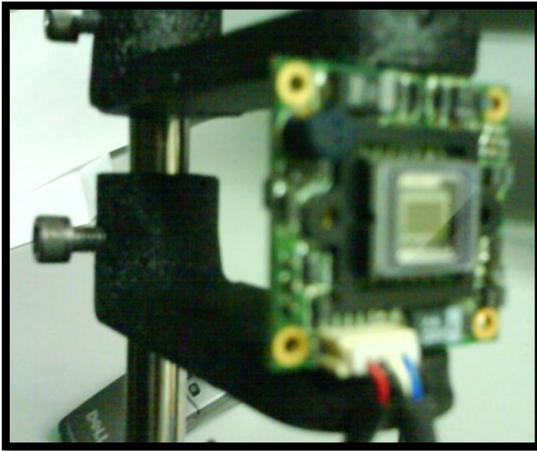
Figura 8.3.1. Objetivo Interferencial Michelson

En la Figura 8.3.1, se ilustra el diseño de bajo aumento de interferencia del objetivo, un nuevo tipo de objetivo (para los instrumentos de TI y con aumentos de 2.5x y 5x) recientemente desarrollado por la empresa Nikon. El uso de un objetivo de bajo aumento tiene dos ventajas. En primer lugar, la distancia de trabajo es relativamente larga (11,1 milímetros para el objetivo de

aumento de 2.5x y 9 milímetros para el objetivo de 5x). En segundo lugar, un amplio campo de visión se puede observar con el beneficio de una gran profundidad de campo. La característica sobresaliente de este objetivo, es el hecho de que la interferencia el centro

del espejo de referencia se encuentra en el eje óptico de la lente del objetivo. Para poder realizar esta función, el espejo de referencia se encuentra en la superficie plana de un hemisferio. El ángulo del espejo se ajusta por medio de dos tornillos detrás del hemisferio.<sup>[10]</sup>

Para este arreglo se probó con 2 cámaras (Figura 8.3.2 y Figura 8.3.3), una de las cuales fue la misma que en el arreglo anterior. La diferencia entre estas dos es que la cámara de la figura 8.3.2 es de mayor calidad en sus imágenes.



**Figura 8.3.2.** Cámara CCD

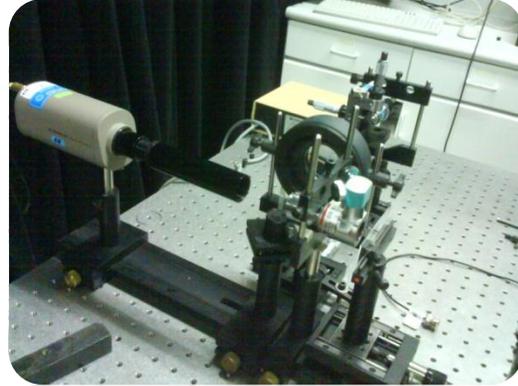


**Figura 8.3.3.** Cámara CCD COHU 4810

Igual que en el arreglo anterior, se probó mejorar el enfoque del escalón y la calidad de las franjas al mismo tiempo, realizando muchos cambios como: el reordenamiento de la alineación del haz del láser, se cambió la emisión de luz láser por la de luz blanca de un proyector (esto solo para centrar el escalón, recordando que este objetivo solo trabaja con luz coherente) y el cambio de la Cámara CCD. Dentro los resultados obtenidos, nos enfrentamos nuevamente a la mala obtención de resultados, ya que no se pudo enfocar el escalón de una manera eficiente al mismo tiempo que se obtuvieran franjas de interferencia de buena calidad. El arreglo es mostrado en la Figura 8.3.4 y 8.3.5 usando las dos cámaras.



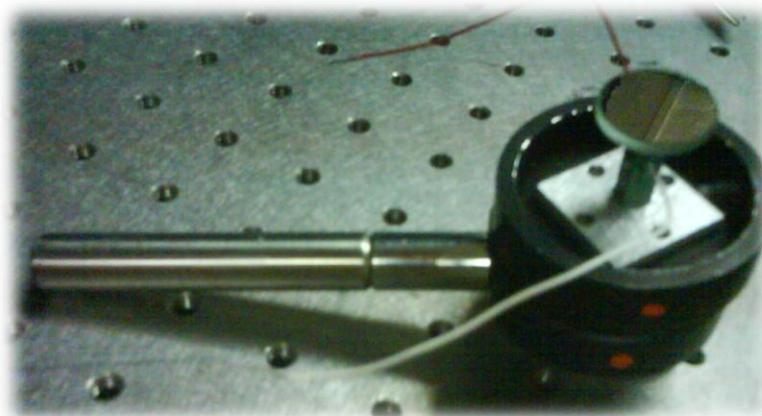
**Figura 8.3.4.**



**Figura 8.3.5.**

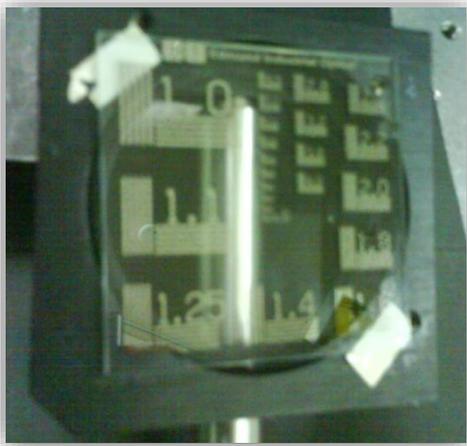
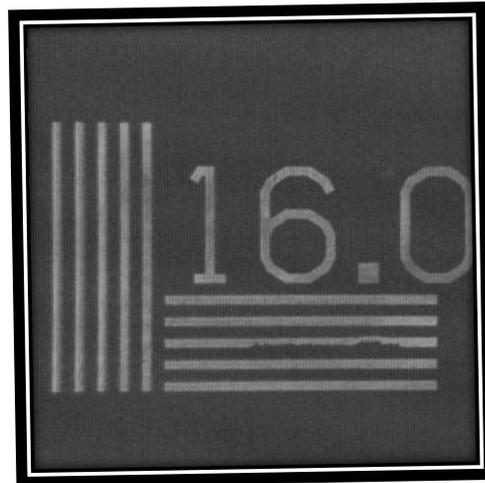
Dado a los resultados obtenidos con el objetivo de microscopio interferencial tipo Michelson nos vimos en la necesidad de realizar un arreglo Michelson sin ningún Objetivo de Microscopio Interferencial, para poder comparar nuestros resultados.

Aquí nuevamente se realizó toda la metodología que se describe en el arreglo con el objetivo de microscopio interferencial tipo Mirau, con la diferencia de que ahora se empleo un espejo pegado a un piezoeléctrico (Figura 8.3.6) para producir la interferencia y realizar el corrimiento de fase. El espejo es algo que ya traen incluidos los objetivos de microscopios interferenciales. Además, se volvió a utilizar el Cubo Divisor de Haz de Luz, que se uso la primera vez, y se siguió utilizando la cámara CCD de la Figura 8.3.2.



**Figura 8.3.6.** Piezoeléctrico montado entre el espejo y la montura mecánica.

Para saber qué cantidad de imagen era la que observábamos con la cámara de la figura 8.3.3 nos vimos en la necesidad de usar una Tarjeta de Resolución (ver figura 8.3.7), la cual nos hace saber por medio de muchas divisiones de líneas de diferentes tamaños cuanto miden una región de pixeles en una imagen. Por ejemplo, en la Figura 8.3.8, observamos las líneas con divisiones de 1/16 de milímetro, esto nos arroja que hay 18 pixeles de una línea a otra, lo que equivale a decir que, en 1/16 de milímetro hay 18 pixeles.

**Figura 8.3.7.** Tarjeta Digitalizadora.**Figura 8.3.8.** Imagen con divisiones de 1/16 de milímetro.

Para saber la cantidad de imagen total que vemos, pues realizamos un regla de tres simple recordando que el tamaño de nuestra cámara total es de 360x360 pixeles, entonces tenemos lo siguiente:

$$\begin{array}{l} 18 \text{ pixeles} \quad \rightarrow \quad 1/16 \\ 360 \text{ pixeles} \quad \rightarrow \quad x \end{array}$$

$$x = 1.25 \text{ milímetros}$$

Esto significa que estamos viendo en la pantalla 1.25x1.25 milímetros de imagen tomada por la cámara CCD.

En este punto se tomo el escalón de 1.005 micrómetro y se le pinto por la parte de atrás de negro para mejorar localidad de las franjas y se monto sobre un piezoeléctrico el cual era desplazado manualmente por nosotros (ver Figuras 8.3.9 y 8.3.10). Se obtuvieron resultados buenos del lado derecho e izquierdo de este, los cuales se observan en al **Anexo 7** del segmento de **Resultados**.

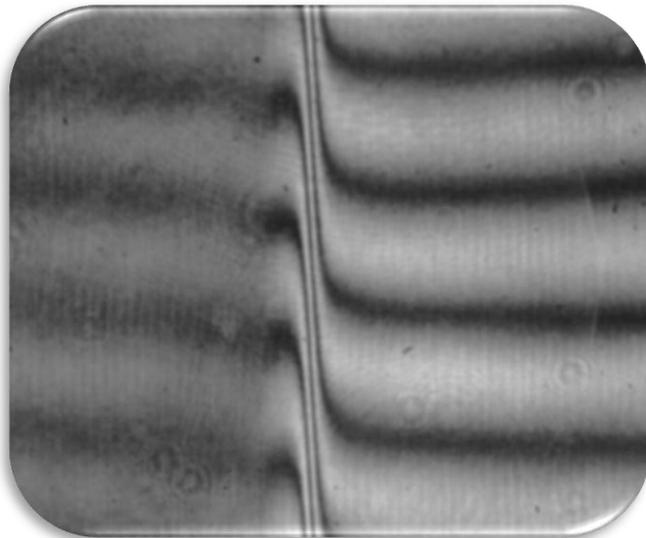


**Figura 8.3.9.** Escalón Pintado.



**Figura 8.3.10.** Escalón Montado.

Este escalón arrojó un desfaseamiento por conteo de franjas (el cual se ve a simple vista en la Figura 8.3.11) de 3 medias longitudes de ondas de desfase aproximadamente, lo que equivaldría a decir que el escalón mide 949.5 nanómetros o 0.9495 según la siguiente fórmula:



**Figura 8.3.11.** Franjas de Interferencia del escalón de 1.005 micrómetros en su lado derecho.

$$d = \frac{\lambda N}{2} \dots \dots (Ecuación 8.3.1.)$$

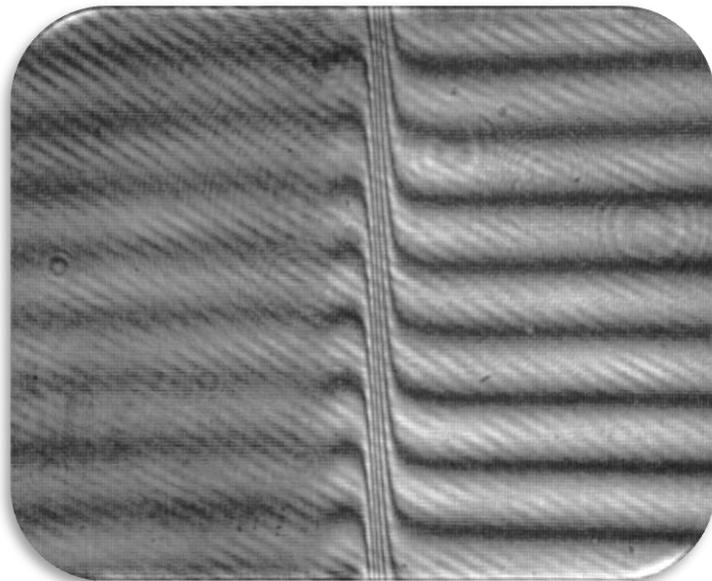
d=Espesor o Altura del escalón.

$\lambda$ =Longitud de onda que produce el Láser (633 nanómetros).

N=Numero de brincos que una franja da, por motivo del desfaseamiento de esta.

Como se podrá ver el resultado es muy cercano a lo que nos marcaron que mide el escalón. Después de esto, el escalón empezó a verse feo por motivo que se ensucio y que posteriormente no se le limpio de una forma apropiada, por lo que se guardo y se paso al siguiente escalón, el de 2.002 micrómetros.

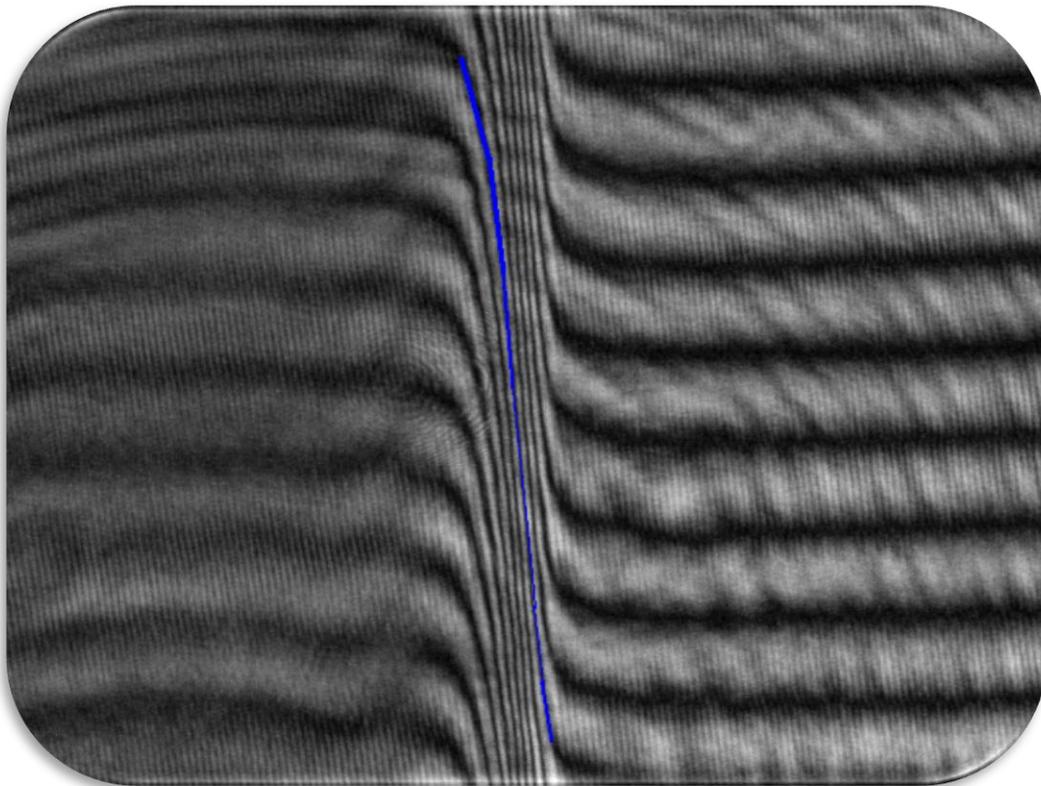
Para este nuevo escalón se volvió a pintar por la parte de atrás por lo ya mencionado y se tubo muchísimo más cuidado para no mancharlo o que sufriera algún daño. En este punto se tomaron las imágenes del lado derecho e izquierdo de este haciendo un mayor énfasis en el lado derecho, ya que el lado izquierdo no presento resultados buenos. Al lado derecho se le hizo un barrido de imágenes sobre todo el escalón. El barrido fue realizado para sacar un promedio de todos los resultados y verificar si realmente el escalón cuenta con el espesor creado. Los resultados obtenidos de este escalón se muestran en el **Anexo 7** del segmento de **Resultados**. La altura obtenida del escalón por conteo de franjas dado por la ecuación 8.3.1 nos arrojó un espesor de 1582.5 nanómetros ó 1.5825



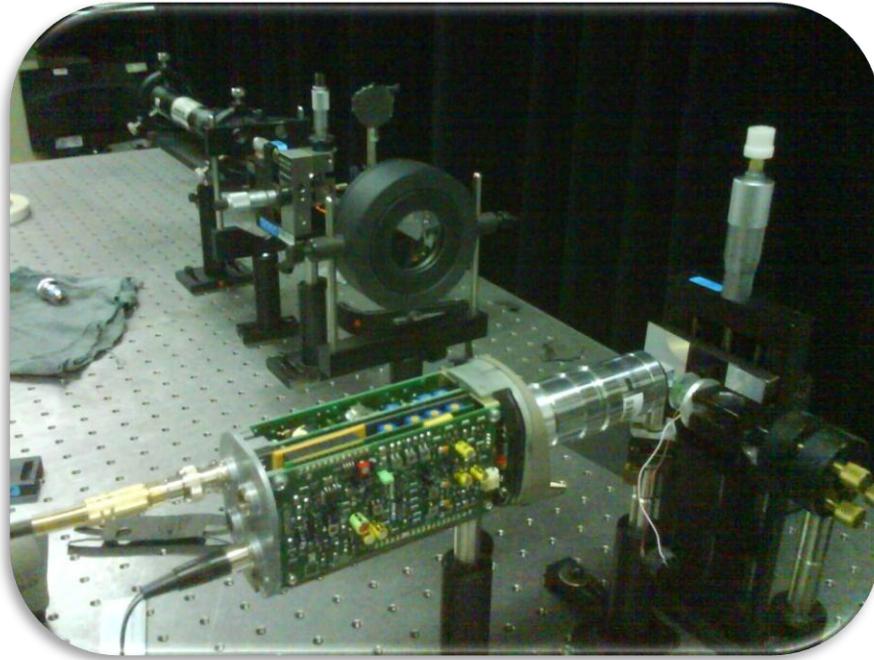
**Figura 8.3.12.** Franjas de Interferencia del escalón de 2.002 micrómetros en su lado derecho.

micrómetros con 5 medias longitudes de ondas de desfase, el cual es un resultado aproximado a los 2.002 micrómetros y se puede apreciar en la Figura 8.3.12.

Posteriormente, obtenido ya los resultados del primer y segundo escalón, se paso al estudio del tercero, el cual arrojaba un desfaseamiento por conteo de franjas de 8.5 medias longitudes de onda de desfaseamiento aproximadamente. Esto equivaldría a tener un espesor de 2690.25 nanómetros o 2.690 micrómetros según la ecuación 8.3.1, los cuales están relativamente cercanos a los 3.003 micrómetros del escalón y se pueden apreciar en la Figura 8.3.13. Los resultados son mostrados en el **Anexo 7** del segmento de **Resultados**. La siguiente imagen representa la colocación de los escalones en el arreglo hecho sin ningún objetivo de microscopio interferencial.



**Figura 8.3.13.** Franjas de Interferencia del escalón de 3.003 micrómetros en su lado derecho.



**Figura 8.3.14.** Arreglo Interferencial sin ningún Objetivo de Microscopio Interferencial

Cabe mencionar que en la figura 8.3.14 la cámara está destapada para poder cambiarle ganancia, contraste, etcétera y con esto poder lograr mayor calidad en las imágenes. Esto se hizo con la ayuda del Ing. Juan Antonio Rayas Álvarez.

Cabe mencionar que para el segundo escalón se le realizó un “Stitching” para el proceso realizado con este, en su lado derecho. El **stitching** o **foto stitching** es el proceso por el cual se combinan múltiples imágenes para producir una imagen panorámica o una imagen de alta resolución, normalmente mediante un programa de ordenador <sup>[18]</sup>. Este proceso fue realizado manualmente con ayuda del Ing. Juan Antonio Rayas Álvarez y programas elaborados en MATCAD, lo cual consistió en tomar cada imagen y aplicarle un filtrado del ruido y quitarle la inclinación que estas presentaban, puesto que el desplazamiento que se hizo en el recorrido del escalón para la toma de las imágenes se realizó de manera manual con giros de un tornillo micrométrico ubicado en la montura que desplazaba a éste en el eje Y. Los resultados son mostrados en el **Anexo 8** del segmento de **Resultados**.



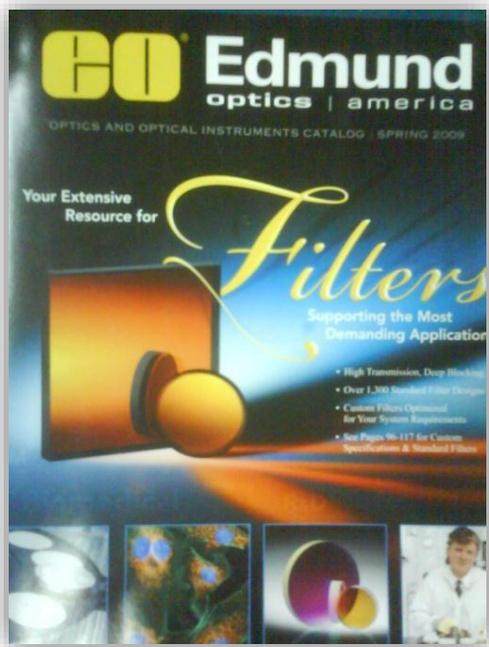
Para contar con un parámetro de referencia para los escalones medidos, se mando a medir el escalón de 2.002 micrómetros al Laboratorio de Metrología Dimensional que se encuentra dentro de las instalaciones del CIO, el cual tiene valides ante el CENAM (Centro Nacional de Metrología), los resultados obtenidos no fueron tan agradables.

#### **8.4. MES DE NOVIEMBRE**

Para este mes nos dedicamos al estudio de las muestras de sistemas ópticos integrados obtenidas a través del Dr. Daniel May Arrijoja del INAOE (Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica).

Estas muestras de microcircuitos on-chip son elementos de óptica integrada, en particular un switch/sensor basado en un sistema interferométrico Mach- Zehnder depositado sobre una oblea de silicio de 0.5X0.5 mm. La importancia de inspeccionar on-chip de este tipo de microcircuitos estriba en detectar posible falla de cambio topográfico de la guía de onda, pues se puede "estrangular" la luz afectando el trabajo normal de interferómetro Mach-Zehnder, cuya función es modular señales ópticas. El interferómetro de Mach-Zehnder (nombrado después de los físicos Luis Mach, hijo de Ernst Mach; y Ludwig Zehnder) es un dispositivo utilizado para determinar el desplazamiento de fase causada por una pequeña muestra que se coloca en el camino de uno de los dos haces colimados (lo que tiene frentes de onda plano) de una fuente de luz coherente. En contraste con el interferómetro de Michelson, hay dos puertos de salida <sup>[19]</sup>. Así que una parte importante del presente proyecto será determinar las variaciones topográficas de este tipo de muestras.

Para su estudio primero se escogieron los guantes necesarios para el manejo de este delicadísimo objeto. Para esto se uso un catalogo mostrado en la figura 8.4.1, donde se eligieron los guantes que después de leer sus especificaciones nos parecieron más apropiados para nuestros fines de manejo, estos son mostrados en la figura 8.4.2.

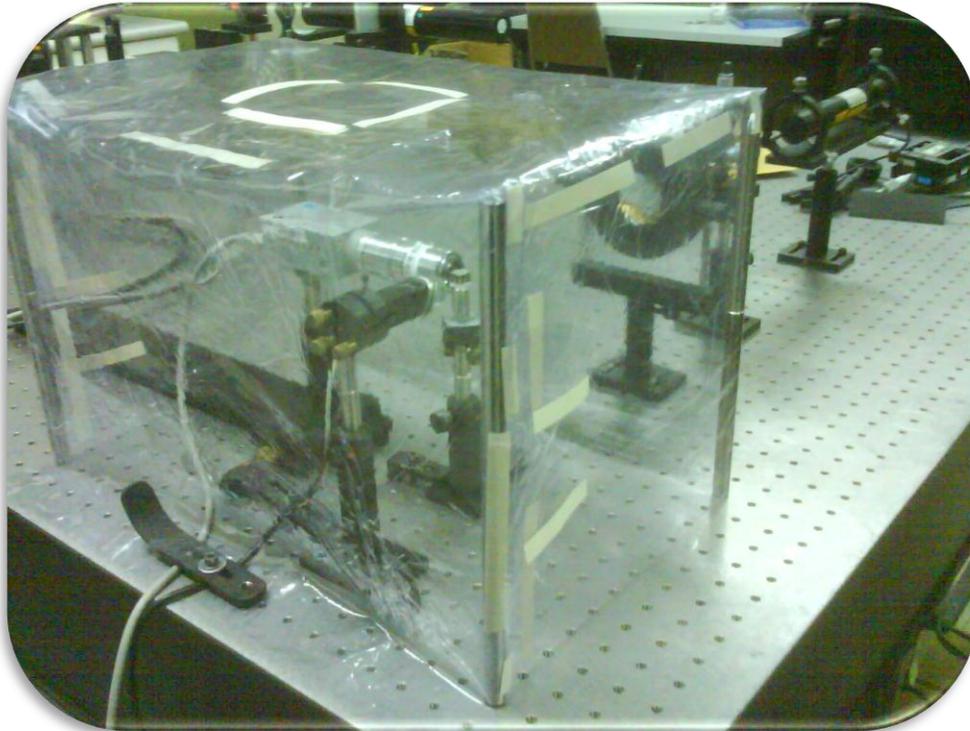


**Figura 8.4.1** Catalogo de óptica e instrumentos de óptica.



**Figura 8.4.2** Guantes bordados Antiestáticos

El sistema óptico integrado se estudio con el arreglo Michelson sin ningún objetivo de microscopio interferencial mostrado en el mes pasado usando el micro circuito como espejo reflejante, el cual arrojo mejores resultados, por lo cual se mantuvo el mismos arreglo acoplándole una pequeña caja hecha de un forro plástico transparente como protección contra el polvo, como se puede apreciar en la Figura 8.4.3.

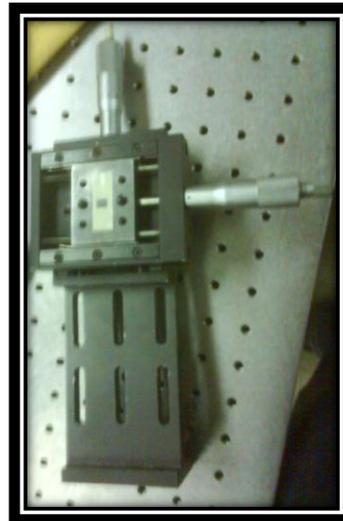


**Figura 8.4.4.** Caja montada como protección para el micro circuito.

El micro impreso a estudiar se saca de su empaque (ver Figura 8.4.5) el cual le ofrece una gran protección y se coloca sobre dos monturas con tornillos micrométricos para permitir su movimiento de arriba abajo y de izquierda a derecha (ver Figura 8.4.6).



**Figura 8.4.5.** Empaque de resguardo del sistema óptico integrado.



**Figura 8.4.6.** Montura usada para el micro circuito.

Para una mejor idea del tamaño del sistema óptico integrado se muestra la siguiente imagen:



**Figura 8.4.7.** El micro circuito Óptico Integrado a la izquierda y una moneda común a la derecha.

Todos los resultados obtenidos de este sistema óptico por el arreglo interferométrico se muestran en el **Anexo 9** en el apartado de **Resultados**, así como las observaciones que se les hicieron a través del microscopio de la figura 8.4.8, el cual ya se encontraba en el laboratorio y que fue adaptado con una cámara para tomar imágenes.



**Figura 8.4.8.** Microscopio.



## 9. RESULTADOS

### Anexo 1

#### Programa 1.

```
%Programa para simular franjas de interferencia
%Programa realizado por: Carlos A. Siller Ventura

clc; clear all;

Io=60;

for i = 1:200
    for j = 1:200
        x = -10+0.1*i;
        y = -10+0.1*j;

        %Diferencia de fase-ecuac. elíptica
        DF=((x-7)/7).^2 + 3*((2*y)/7).^2;

        %Ecuación de interferencia
        I(i,j)=4*Io*(cos(DF/2)).^2;
    end
end

end

%Muestra en pantalla una grafica en escala de grises por eso los valores
de 0 a 255
imshow(I, [0 255]);
```

#### Programa 2.

```
%Programa para simular franjas de interferencia con una visibilidad dada
%Programa realizado por: Carlos A. Siller Ventura

clc; clear all;

Io=127;
fprintf('\n Recuerda lo siguiente:');
fprintf('\n >El Valor de 0 es para ver franjas opacas');
fprintf('\n >El Valor de 1 es para ver franjas bien definidas');
fprintf('\n Elige un valor entre estos rangos');
Vi=input('\n\n Dame el valor de Visibilidad de Franja:');

if (Vi<0 || Vi>1)
    fprintf('\n Recuerda que los valores permisibles son entre 0 y 1');

else
for i = 1:200
    for j = 1:200
        x = -10+0.1*i;
```



```
y = -10+0.1*j;  
  
%Diferencia de fase  
DF=((x-7)/7).^2 + 3*((2*y)/7).^2;  
  
%Ecuación de interferencia  
I(i,j)=2*Io*(1+Vi*cos(DF));  
end  
  
end  
  
imshow(I, [0 255]);  
end
```

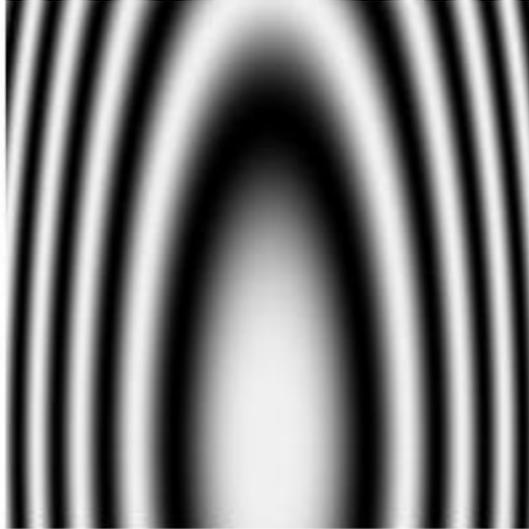
### Programa 3.

```
%Programa para simular franjas de interferencia con una visibilidad dada  
y Ruido  
%Programa realizado por: Carlos A. Siller Ventura  
  
clc; clear all;  
  
Io=127;  
fprintf('\n Recuerda lo siguiente:');  
fprintf('\n >El Valor de 0 es para ver franjas opacas');  
fprintf('\n >El Valor de 1 es para ver franjas bien definidas');  
fprintf('\n Elige un valor entre estos rangos');  
Vi=input('\n\n Dame el valor de Visibilidad de Franja:');  
  
if (Vi<0 || Vi>1)  
    fprintf('\n Recuerda que los valores permisibles son entre 0 y 1');  
else  
for i = 1:200  
    for j = 1:200  
        x = -10+0.1*i;  
        y = -10+0.1*j;  
  
        %Diferencia de fase  
        DF=((x-7)/7).^2 + 3*((2*y)/7).^2;  
  
        %Ruido  
        N=254*rand-254;  
  
        %Ecuacion de interferencia  
        I(i,j)=2*Io*[1+Vi*cos(DF)+(N/(2*Io))];  
    end  
end  
  
end  
  
imshow(I, [0 255]);  
end
```

## Anexo 2

### Programa 1.

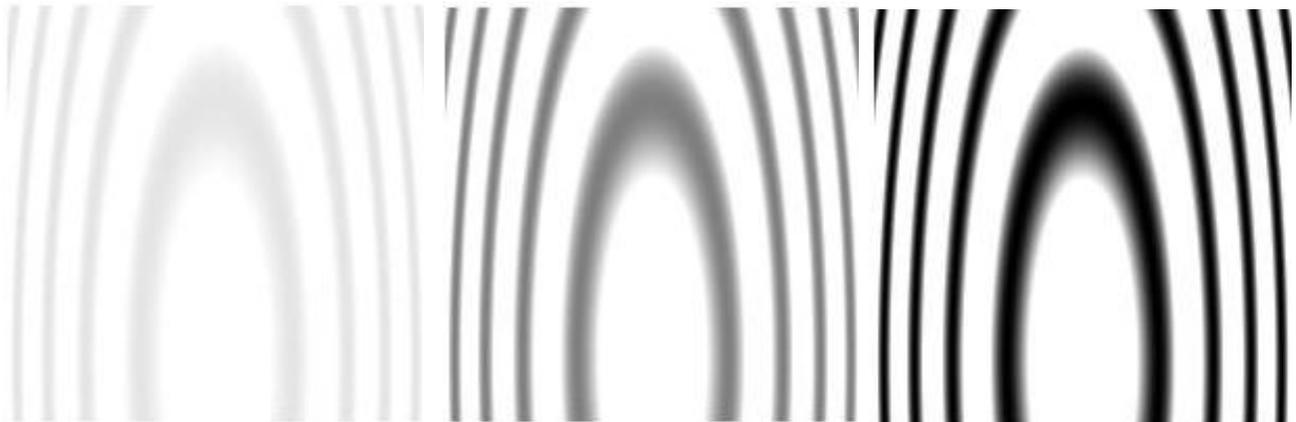
Imagen arrojada por la simulación.



**Figura 9.2.1**

### Programa 2.

Simulación de diferentes visibilidades.



**Figura 9.2.2.**

**Figura 9.2.3.**

**Figura**

**9.2.4.**

**Figura 9.2.2.-** Imagen simulada con una visibilidad de 0.1

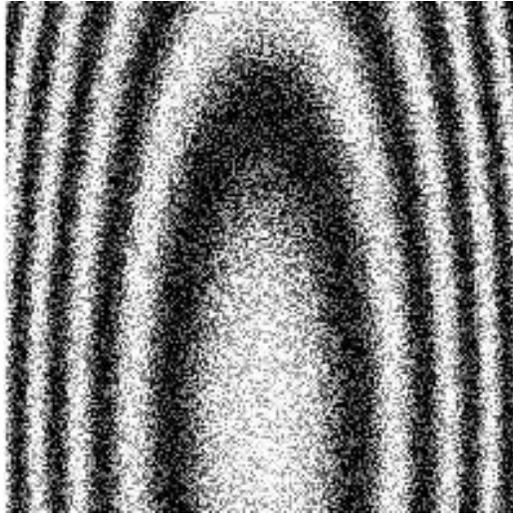
**Figura 9.2.3.-** Imagen simulada con una visibilidad de 0.5

**Figura 9.2.4.-** Imagen simulada con una visibilidad de 0.1



**Programa 3.**

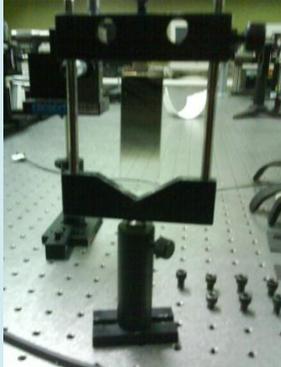
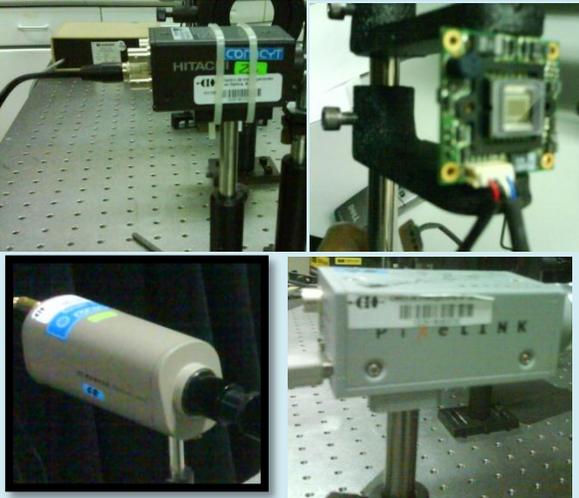
En la figura 3.1 se puede ver lo simulado con una visibilidad de 0.5 e introducción de ruido.

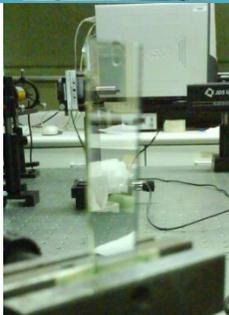


**Figura 9.2.5.**

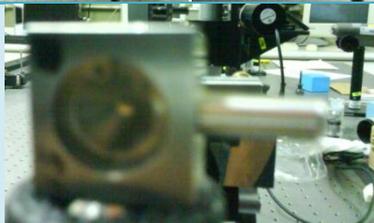
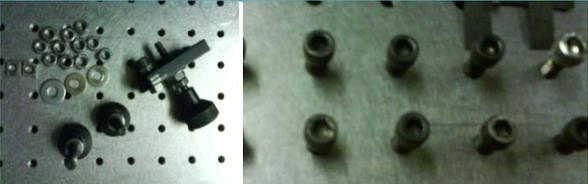
### Anexo 3

**Tabla 9.3.1. Materiales usados.**

Material	Cantidad	Imagen
<b>Atenuador</b>	1	
<b>Cables Coaxiales</b>	3	
<b>Cámaras CCD</b>	4	
<b>Colimador de Haz de luz</b>	1	

<p><b>Controlador de Piezoeléctrico de canal simple</b></p>	<p>1</p>			
<p><b>Cubo divisor de Haz 50x50</b></p>	<p>1</p>			
<p><b>Diafragma</b></p>	<p>1</p>			
<p><b>Divisor de Haz plano</b></p>	<p>1</p>			
<p><b>Escalones</b></p>	<p>3</p>			

<p><b>Filtro Espacial</b></p>	<p>1</p>	
<p><b>Láser ( <math>\lambda=633</math> nanómetros )</b></p>	<p>1</p>	
<p><b>Monturas Mecánicas</b></p>	<p>Los necesarios</p>	
<p><b>Objetivo interferométrico</b></p>	<p>1</p>	
<p><b>Objetivo de Microscopio Interferencial tipo Mirau</b></p>	<p>1</p>	

<p><b>Objetivo de Microscopio Interferencial tipo Michelson</b></p>	<p>1</p>	
<p><b>Piezoeléctrico</b></p>	<p>3</p>	
<p><b>Pinhole</b></p>	<p>1</p>	
<p><b>Proyector</b></p>	<p>1</p>	
<p><b>PC</b></p>	<p>1</p>	
<p><b>Tornillos, Tuercas, Rondanas, cuñas, etc.</b></p>	<p>Los necesarios</p>	

## Anexo 4

Mejoramiento de las franjas por medio del espejo.

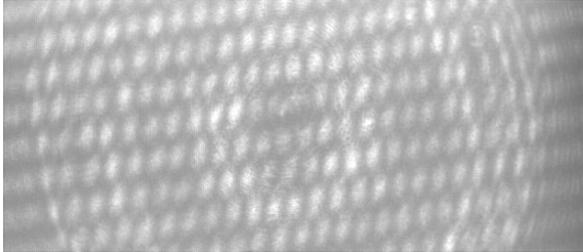


Figura 9.4.1.

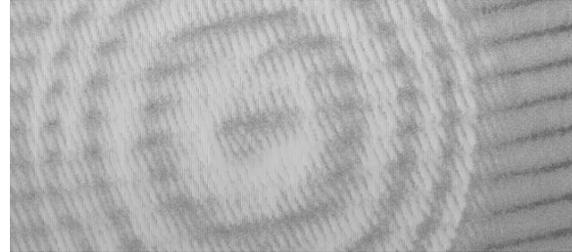


Figura 9.4.2.



Figura 9.4.3.



Figura 9.4.4.

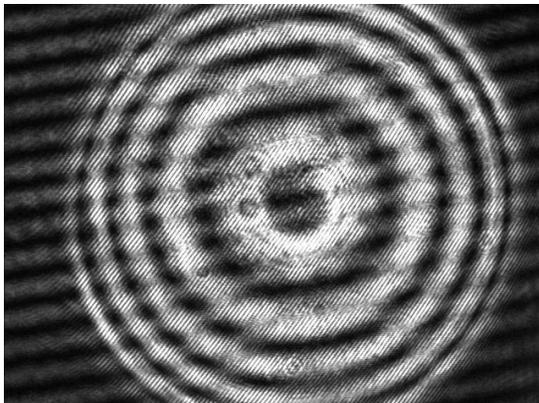


Figura9.4.5.

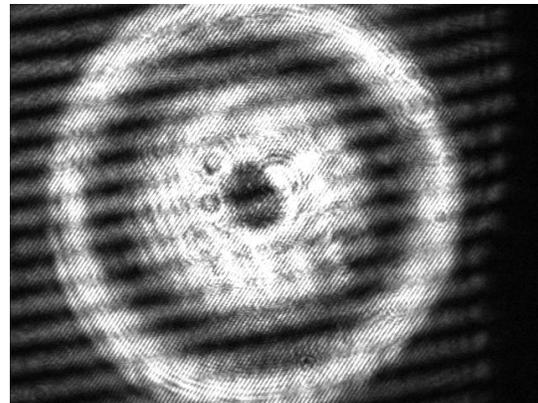
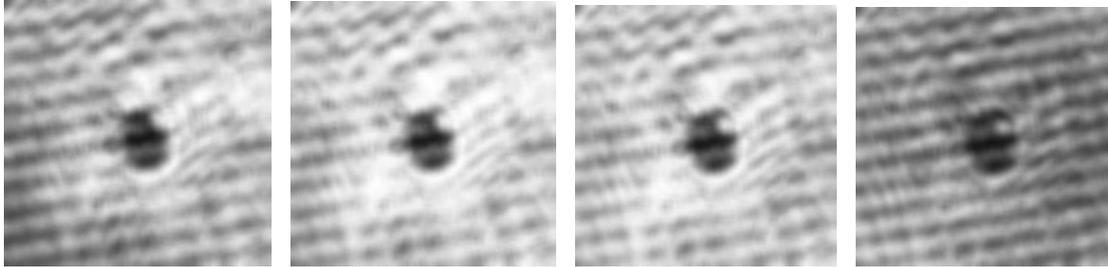


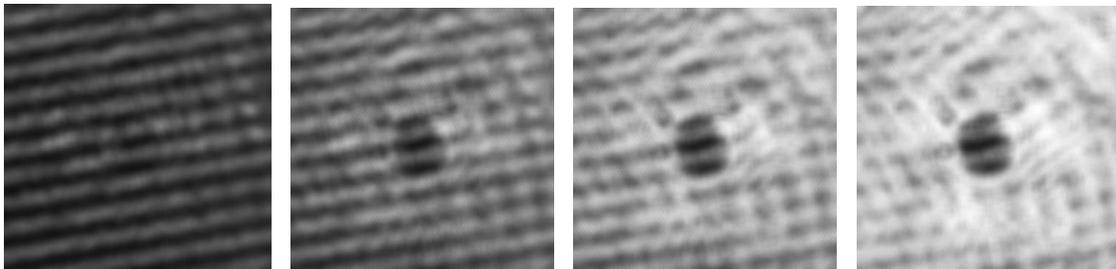
Figura 9.4.6.

**Evolución de las imágenes de interferencia producidas por el espejo, obtenidas mediante el corrimiento de fase, realizado por un programa en LABVIEW.**

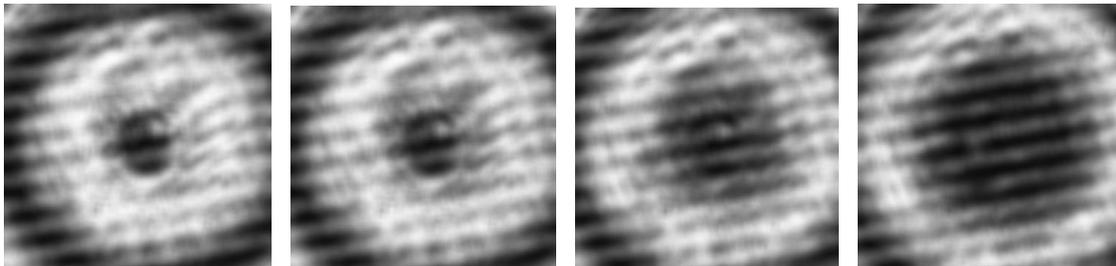
Prueba 1



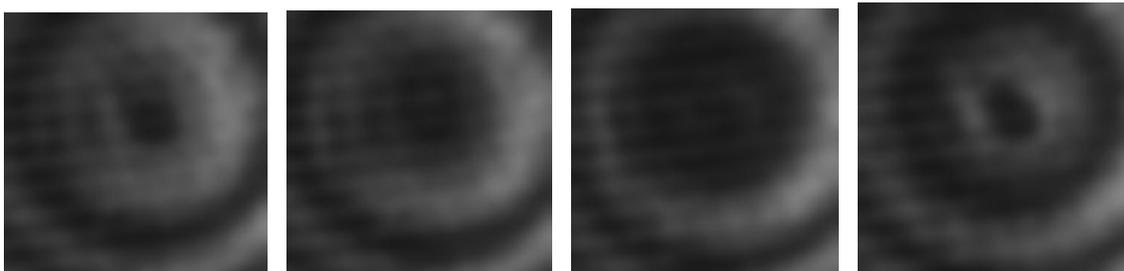
Prueba 10



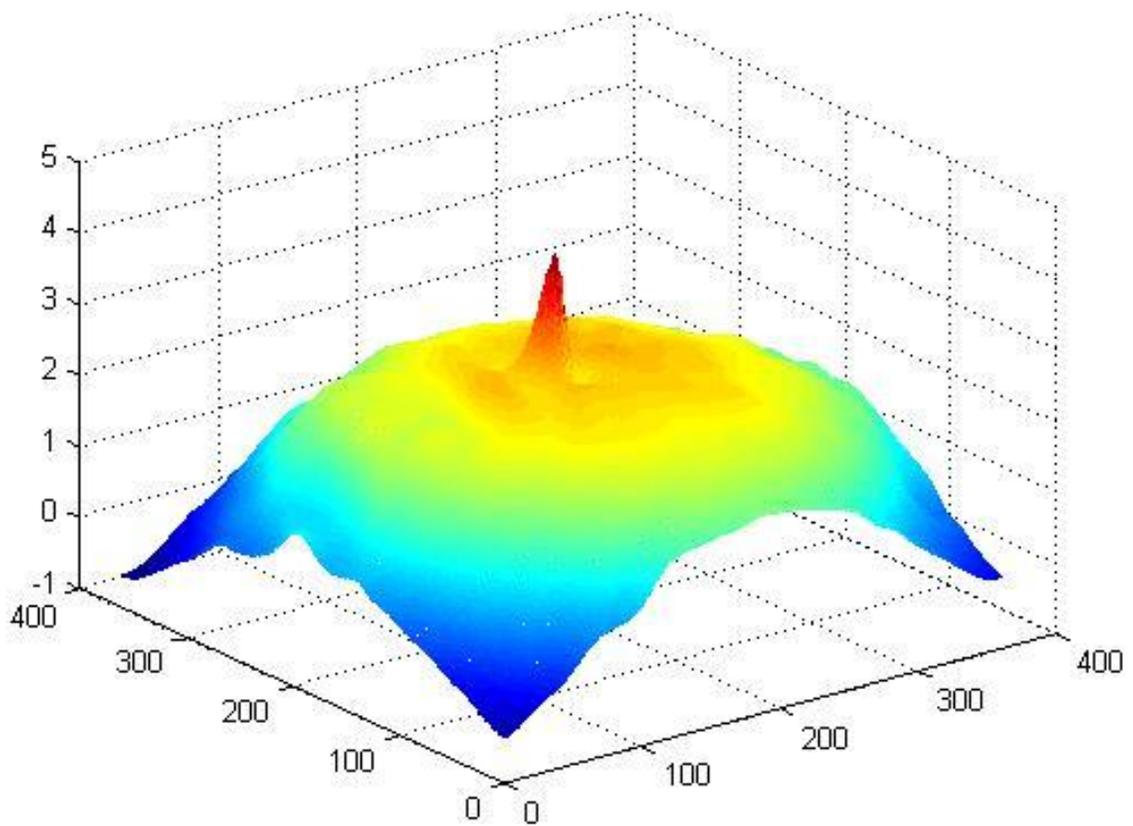
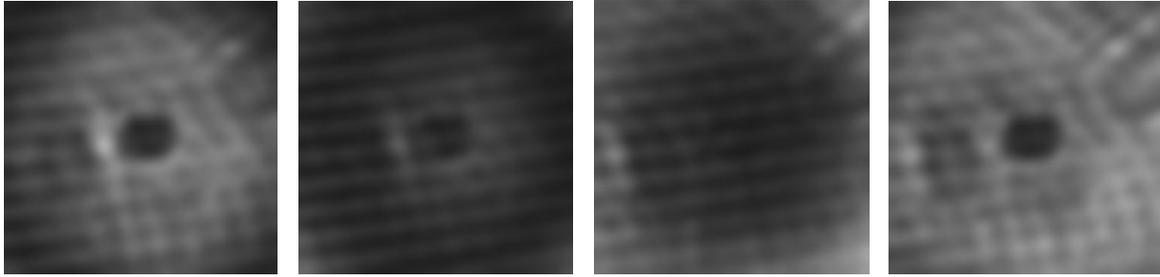
Prueba 30



Prueba 45



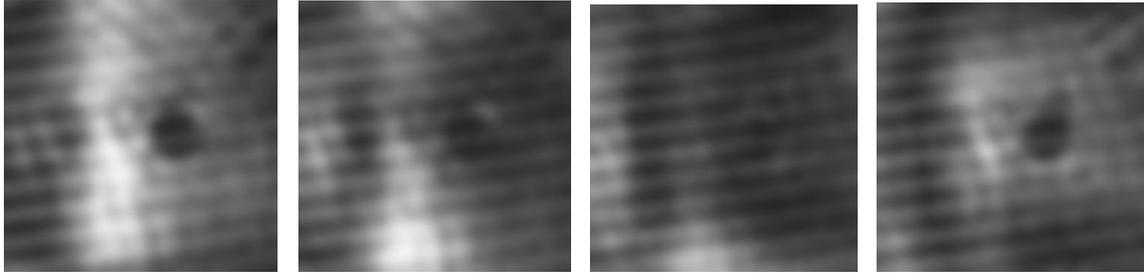
Prueba del 22-09-09\_5



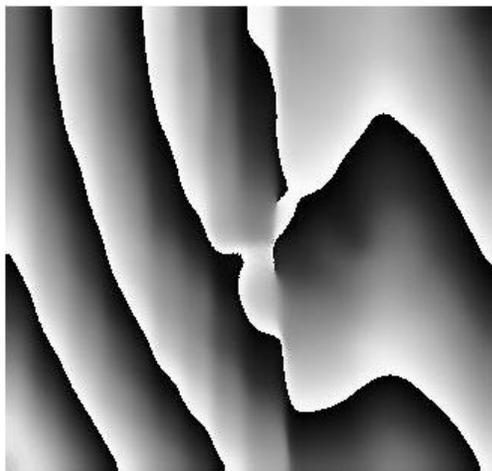
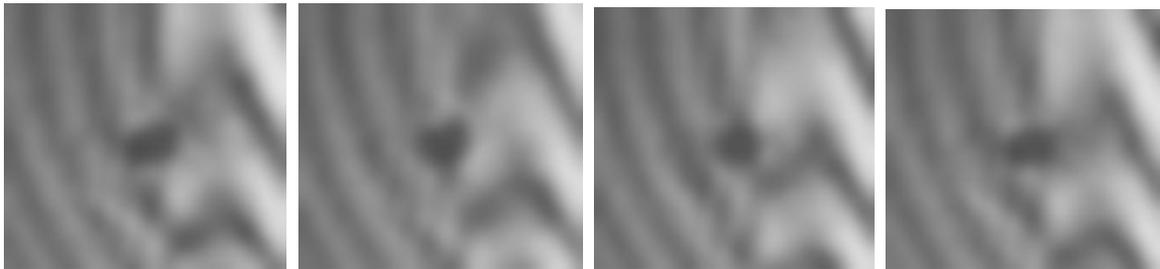
**Figura 9.4.7.** Gráfica de la desenvuelta de los datos obtenidos de la prueba 22-09-09\_5.

**Evolución de las imágenes de interferencia producidas por el escalón, obtenidas mediante el corrimiento de fase, realizado por un programa en LABVIEW.**

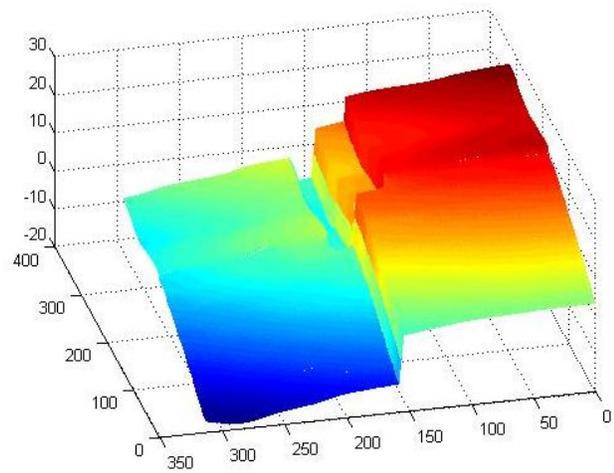
Prueba del 23-09-09\_3



Prueba del 25-09-09



**Figura 9.4.8.** Fase Envuelta



**Figura 9.4.9.** Fase Desenvuelta

## Anexo 5

### Programa 4.

%Programa para filtrar franjas con transformada de Fourier.



%Realizado por: Carlos A. Siller Ventura

```
clc; clear all;
```

```
%Escribir el nombre, y si es necesario dirección, en la que se encuentra  
la imagen. Recuerda que la imagen debe de estar dentro de la carpeta de  
MATLAB.
```

```
% Función para leer imágenes (imread)  
imag=imread('Imagenes/imagenespejo.bmp');  
%muestra la imagen en escala de grises (imshow)  
imshow(imag,[0 255]); %niveles de grises (0 a 255)  
pause (2); %mantiene por 2 segundo la imagen para poder apreciarla
```

```
%Transformada de Fourier en 2 dimensiones (fft2)  
TF=fft2(imag);  
imshow(TF,[0 255]);  
pause (2);
```

```
%Compone la frecuencia al centro del espectro (fftshift).  
FFTF=fftshift(TF);  
imshow(FFTF,[0 255]);  
pause (2);
```

```
%logaritmo natural  
b=log(FFTF);  
imshow(b,[ ]);  
pause (2);
```

```
%Creación de la máscara para quitar lo que no nos importa  
[m,n]=size(b);
```

```
%Coordenadas para centrar el círculo blanco  
fila=m/2;  
columna=n/2;
```

```
for i= 1:1:m  
    for j= 1:1:n  
  
        ecu=sqrt((i-fila).^2+(j-columna).^2);  
  
        if ecu>10%radio del circulo que saldrá  
            A(i,j)=0;  
        else  
            A(i,j)=1;  
        end  
    end  
end
```

```
imshow(A,[ ]);  
pause (2);
```

```
%Multiplicación de la máscara por la transformada  
Acom=complex(A);%conversión de la matriz real A, a una matriz compleja  
H=FFTF.*Acom;
```



```
imshow(H, [0 255]);  
pause (2);  
  
%"ifftshift" inverso de fftshift.  
F=fftshift(H);  
imshow(F, [ ]);  
pause (2);  
  
%Transformada inversa de Fourier en 2 dimensiones (ifft2).  
TRI=ifft2(H);  
imshow(TRI, [0 255]);  
pause (2);
```

### Programa 5.

%Programa para simular franjas de interferencia con una visibilidad dada y ruido metiendo transformada de Fourier.

%Programa realizado por: Carlos A. Siller Ventura

```
clc; clear all;
```

```
Io=127;  
fprintf('\n Recuerda lo siguiente:');  
fprintf('\n >El Valor de 0 es para ver franjas opacas');  
fprintf('\n >El Valor de 1 es para ver franjas bien definidas');  
fprintf('\n Elige un valor entre estos rangos');  
Vi=input('\n\n ¿Qué Visibilidad de Franjas deseas?:');  
  
if (Vi<0 || Vi>1)  
    fprintf('\n Recuerda que los valores permisibles son entre 0 y 1');  
else  
for i = 1:200  
    for j = 1:200  
        x = -10+0.1*i;  
        y = -10+0.1*j;  
        %Diferencia de fase  
        DF=((x-7)/7).^2 + 3*((2*y)/7).^2;  
        %Ruido  
        N=254*rand-254;  
        %Ecuación de interferencia  
        I(i,j)=2*Io*[1+Vi*cos(DF)+(N/(2*Io))];  
    end  
end  
  
end  
  
%Muestra en pantalla una grafica en escala de grises por eso los valores  
de 0 a 255  
imshow(I, [0 255]);  
pause (2);  
end  
  
%Transformada de Fourier en 2 dimensiones (fft2)  
TF=fft2(I);  
imshow(TF, [0 255]);  
pause (2);
```



```
%Compone la frecuencia al centro del espectro (fftshift).
FFTF=fftshift(TF);
imshow(FFTF,[0 255]);
pause (2);

%logaritmo natural (para poder observar mejor la FFTF)
b=log(FFTF);
imshow(b,[ ]);
pause (2);

%Creación de la máscara para quitar lo que no nos importa
[m,n]=size(b);

%Coordenadas para centrar el círculo blanco
fila=m/2;
columna=n/2;

for i= 1:1:m
    for j= 1:1:n

        ecu=sqrt((i-fila).^2+(j-columna).^2);

        if ecu>10 %radio del circulo que saldrá
            A(i,j)=0;
        else
            A(i,j)=1;
        end
    end
end

imshow(A,[ ]);
pause (2);

%Multiplicación de la máscara por la transformada
Acom=complex(A); %conversión de la matriz real A a una matriz compleja
H=FFTF.*Acom;
imshow(H,[0 255]);
pause (2);

%"ifftshift" inverso de fftshift.
F=ifftshift(H);
imshow(F,[ ]);
pause (2);

%Transformada inversa de Fourier en 2 dimensiones (ifft2).
TRI=ifft2(H);
imshow(TRI,[0 255]);
pause (2);
```

## Programa 6.

```
% Método de los 4 pasos para la Fase envuelta.
clear all; clc;
```



```
e1=imread('Imágenes 250909-1/250909-1_1.bmp');
e2=imread('Imágenes 250909-1/250909-1_2.bmp');
e3=imread('Imágenes 250909-1/250909-1_3.bmp');
e4=imread('Imágenes 250909-1/250909-1_4.bmp');

%Los elementos que constituyen una imagen en matlab tienen el formato
entero uint8, que es un tipo de dato que puede variar de 0 a 255, sin
poder soportar decimales y valores que salgan fuera de ese rango. Lo
anterior resulta una desventaja principalmente en aquellos casos donde se
implementan algoritmos que trabajan con este tipo de datos para realizar
operaciones de división o multiplicación por tipo de dato flotante. En
estos casos es necesario transformar la imagen de tipo de dato uint8 a
double.
I1=double(e1);
I2=double(e2);
I3=double(e3);
I4=double(e4);

a=I4-I2;
b=I1-I3;

% Formula despejada de la Fase Envuelta
FE=atan2(a,b); % "atan2" arcotangente en 2-dimensiones

% Función que convierte una matriz en una imagen de escala de grises
(mat2gray)
FEconv=mat2gray(FE);
imshow(FEconv, [ ]);
pause(6);

%Función que crear superficies paramétricas especificadas por X, Y y Z
(mesh)
mesh(FEconv);
```

### Programa 7.

```
%Método de 4 pasos para calcular la Fase envuelta con filtro de franjas
usando transformada de Fourier.
%Realizado por: Carlos A. Siller Ventura

clc; clear all;

%
%Primera Imagen
%

imag=imread('Imágenes 250909/250909-1_1.bmp');

TF=fft2(imag);
FFTF=ifftshift(TF);
b=log(FFTF);
%Creación de la máscara para quitar lo que no nos importa
```



```
[m,n]=size(b);

fila=m/2;
columna=n/2;

for i= 1:1:m
    for j= 1:1:n

        ecu=sqrt((i-fila).^2+(j-columna).^2);

        if ecu>10
            A(i,j)=0;
        else
            A(i,j)=1;
        end
    end
end

Acom=complex(A);
H=FFTF.*Acom;
F=ifftshift(H);
In1=ifft2(F);

%
% Segunda Imagen
%

imag2=imread('Imagenes 250909/250909-1_2.bmp');

TFi2=fft2(imag2);
FFTFi2=fftshift(TFi2);
bi2=log(FFTFi2);

%Creación de la máscara para quitar lo que no nos importa
[m2,n2]=size(bi2);

fila2=m2/2;
columna2=n2/2;

for i= 1:1:m2
    for j= 1:1:n2

        ecu2=sqrt((i-fila2).^2+(j-columna2).^2);

        if ecu2>10
            A2(i,j)=0;
        else
            A2(i,j)=1;
        end
    end
end

%Multiplicación de la máscara por la transformada
Acomi2=complex(A2);%conversión de la matriz real A, a una matriz compleja
```



```
Hi2=FFTFi2.*Acomi2;
Fi2=ifftshift(Hi2);
In2=ifft2(Fi2);

%
%Tercera Imagen
%

imagi3=imread('Imágenes 250909/250909-1_3.bmp');
TFi3=fft2(imagi3);
FFTFi3=fftshift(TFi3);
bi3=log(FFTFi3);

%Creación de la máscara para quitar lo que no nos importa
[m3,n3]=size(bi3);

fila3=m3/2;
columna3=n3/2;

for i= 1:1:m3
    for j= 1:1:n3

        ecu3=sqrt((i-fila3).^2+(j-columna3).^2);

        if ecu3>10
            A3(i,j)=0;
        else
            A3(i,j)=1;
        end
    end
end

Acomi3=complex(A3);
Hi3=FFTFi3.*Acomi3;
Fi3=ifftshift(Hi3);
In3=ifft2(Fi3);

%
% Cuarta Imagen
%

imagi4=imread('Imágenes 250909/250909-1_4.bmp');
TFi4=fft2(imagi4);
FFTFi4=fftshift(TFi4);
bi4=log(FFTFi4);

%Creación de la máscara para quitar lo que no nos importa
[m4,n4]=size(bi4);

fila4=m4/2;
columna4=n4/2;

for i= 1:1:m4
    for j= 1:1:n4
```



```
ecu4=sqrt((i-fila4).^2+(j-columna4).^2);

    if ecu4>10
        A4(i,j)=0;
    else
        A4(i,j)=1;
    end
end
end

Acomi4=complex(A4);
Hi4=FFTFi4.*Acomi4;
Fi4=ifftshift(Hi4);
In4=ifft2(Fi4);

%
% Fase envuelta
%

I1=double(In1);
I2=double(In2);
I3=double(In3);
I4=double(In4);

Y=I4-I2;
X=I1-I3;

FE=atan2(Y,X);

FEconveg=mat2gray(FE);
imshow(FEconveg, [ ]);
pause(5);

mesh(FEconveg);
```

### Programa 8.

```
% Programa para leer datos.
% carga las variables del área de trabajo desde disco
datos=load('Nombre aquí.txt');
mesh(datos);

% leer datos de Excel (xlsread)
datos=xlsread('Nombre aquí.xls');
mesh(datos);
```

### Programa 9.

```
% Programa para filtrar imágenes con la función "average" de MATLAB.
```



% Realizado por: Carlos Arturo Siller Ventura

```
clear all; clc;

n=input(' Dime de cuanto sera la dimensiones de la Matriz cuadrada: ');
ite=input('\n Cuantos iteraciones quieres que se realicen a las imágenes:
');

imag1=imread('Imagenes 250909-1/250909-1_1.bmp');
imag2=imread('Imagenes 250909-1/250909-1_2.bmp');
imag3=imread('Imagenes 250909-1/250909-1_3.bmp');
imag4=imread('Imagenes 250909-1/250909-1_4.bmp');

for i = 1:ite
    % "fspecial" Crea un filtro predefinido 2-D del tipo especificado.
    h = fspecial('average',[n n]); % "average" filtro promediador
    In1 = imfilter(imag1,h); % "imfilter" filtrado de imágenes
    multidimensionales de N-Dimensiones

end

for i = 1:ite
    h = fspecial('average',[n n]);
    In2 = imfilter(imag2,h);
end

for i = 1:ite
    h = fspecial('average',[n n]);
    In3 = imfilter(imag3,h);
end

for i = 1:ite
    h = fspecial('average',[n n]);
    In4 = imfilter(imag4,h);
end

I1=double(In1);
I2=double(In2);
I3=double(In3);
I4=double(In4);

% Fase envuelta
FE=atan2((I4-I2),(I1-I3));

% "subplot" divide a la pantalla donde se mostraran las imágenes, creando
ejes en posiciones de azulejos
subplot(1,2,1);

% "mat2gray" convierte la matriz en una imagen en escala de grises
FEconveg=mat2gray(FE);
imshow(FEconveg,[ ]);

subplot(1,2,2);
```



mesh (FEconv) ;

### Programa 10.

% Método de los 4 pasos para la Fase envuelta y desenvuelta con mascara circular, otorgando el centro con un clic.

clear all; clc;

```
e1=imread('Imagenes 250909-1/250909-1_1.bmp');  
e2=imread('Imagenes 250909-1/250909-1_2.bmp');  
e3=imread('Imagenes 250909-1/250909-1_3.bmp');  
e4=imread('Imagenes 250909-1/250909-1_4.bmp');
```

```
I1=double(e1);  
I2=double(e2);  
I3=double(e3);  
I4=double(e4);
```

```
a=I4-I2;  
b=I1-I3;
```

```
FE=atan2(a,b);
```

```
figure(1) % "Figure" Hace referencia a la creación de objetos de figuras graficas  
subplot(2,2,1);  
FEconv=mat2gray(FE);  
imshow(FEconv,[ ]);
```

```
subplot(2,2,2);  
mesh(FEconv);
```

```
subplot(2,2,3);  
uw1=unwrap(FE); % "unwrap" función de MATLAB para corregir los ángulos de fase produciendo figuras de fase suave (desenvuelta). Esta, cuando es una matriz, se realiza solo en una dirección (en las columnas) de arriba hacia abajo.  
trans1=uw1.'; % "." Transpuesta. Utilizada para realizar la transformada en las dos direcciones, tanto en filas como en columnas.  
uw2=unwrap(trans1);  
trans2=uw2.';  
imshow(trans2,[ ]);
```

```
subplot(2,2,4);  
mesh(trans2);
```

```
figure(2)  
subplot(2,2,1);  
imshow(FEconv);
```

```
%Creación de la máscara para quitar lo que no deseamos  
[w,e]=size(FE);
```



```
%Coordenadas para centrar el círculo obscuro mediante un clic
[Xc,Yc]=ginput(1); %"ginput" Guarda datos a partir de un clic en el
grafico

for i= 1:1:w
    for j= 1:1:e

        ecuac=sqrt((i-Yc).^2+(j-Xc).^2);

        if ecuac>50
            A(i,j)=1;
        else
            A(i,j)=0;
        end
    end
end

%Multiplicación de la máscara por la fase envuelta convertida
Acomp=complex(A);% conversión de la matriz real A, a una matriz compleja
mul=FE.*Acomp;
imshow(mul,[ ]);
mulconv=mat2gray(mul);

subplot(2,2,2);
mesh(mulconv);

subplot(2,2,3);
des=unwrap(mul,[ ],Acomp);
tra1=des.';
des2=unwrap(tra1,[ ],Acomp);
tra2=des2.';
imshow(tra2,[ ]);

subplot(2,2,4);
mesh(tra2);
```

### Programa 11.

% Método de los 4 pasos para la Fase envuelta y desenvuelta con creación de máscaras entre desenvueltas.

```
clear all; clc;

e1=imread('Imagenes 250909-1/250909-1_1.bmp');
e2=imread('Imagenes 250909-1/250909-1_2.bmp');
e3=imread('Imagenes 250909-1/250909-1_3.bmp');
e4=imread('Imagenes 250909-1/250909-1_4.bmp');

I1=double(e1);
I2=double(e2);
I3=double(e3);
```



```
I4=double (e4) ;

a=I4-I2;
b=I1-I3;

FE=atan2 (a,b) ;

figure (1)
subplot (2,2,1);
FEconv=mat2gray (FE) ;
imshow (FEconv, [ ]);

subplot (2,2,2);
mesh (FEconv) ;

subplot (2,2,3);
uw1=unwrap (FE) ;
trans1=uw1.';
uw2=unwrap (trans1);
trans2=uw2.';
imshow (trans2, [ ]);

subplot (2,2,4);
mesh (trans2);

figure (2)
subplot (2,3,1);
imshow (FEconv);

% Creación de la máscara para quitar lo que no deseamos
[w,e]=size (FE);

% Coordenadas para centrar el círculo oscuro con la aplicación de un clic
[Xc,Yc]=ginput (1);

for i= 1:1:w
    for j= 1:1:e

        ecuac=sqrt ((i-Yc).^2+(j-Xc).^2);

        if ecuac>50
            A(i,j)=1;
        else
            A(i,j)=0;
        end
    end
end

Acomp=complex (A) ;
mul=FE.*Acomp;
imshow (mul, [ ]);

subplot (2,3,2);
mulconv=mat2gray (mul) ;
```



```
mesh(mulconv);

subplot(2,3,3);
des=unwrap(mul,[],Acomp);
tra1=des.';
imshow(tra1);
subplot(2,3,4);
imshow(tra1);

% Creación de la máscara para quitar lo que no deseamos
[w2,e2]=size(tra1);

% Coordenadas para centrar el círculo oscuro con la aplicación de un clic
[Xc2,Yc2]=ginput(1);
for i= 1:1:w2
    for j= 1:1:e2

        ecuac2=sqrt((i-Yc2).^2+(j-Xc2).^2);

        if ecuac2>60
            A2(i,j)=1;
        else
            A2(i,j)=0;
        end
    end
end

Acomp2=complex(A2);
mul2=tra1.*Acomp2;
imshow(mul2,[ ]);

subplot(2,3,5);
des2=unwrap(tra1,[],Acomp2);
tra2=des2.';
imshow(tra2,[ ]);

subplot(2,3,6);
mesh(tra2);
```

## Programa 12.

% Método de los 4 pasos para la Fase envuelta y desenvuelta con inserción, de 2 clics, de una máscara para corregir la desenvuelta.

```
clear all; clc;

e1=imread('Imágenes 250909-1/250909-1_1.bmp');
e2=imread('Imágenes 250909-1/250909-1_2.bmp');
e3=imread('Imágenes 250909-1/250909-1_3.bmp');
e4=imread('Imágenes 250909-1/250909-1_4.bmp');

I1=double(e1);
```



```
I2=double (e2) ;
I3=double (e3) ;
I4=double (e4) ;

a=I4-I2;
b=I1-I3;

FE=atan2 (a,b) ;

figure (1)
subplot (2,2,1) ;
FEconv=mat2gray (FE) ;
imshow (FEconv, [ ] ) ;

subplot (2,2,2) ;
mesh (FEconv) ;

subplot (2,2,3) ;
uw1=unwrap (FE) ;
trans1=uw1.' ;
uw2=unwrap (trans1) ;
trans2=uw2.' ;
imshow (trans2, [ ] ) ;

subplot (2,2,4) ;
mesh (trans2) ;

figure (2)

imshow (trans2, [ ] ) ;

%Creación de la máscara para quitar lo que no nos interesa
[w,e]=size (FE) ;

% Coordenadas para centrar el rectángulo con dos clics
[X1,Y1]=ginput (1) ;
[X2,Y2]=ginput (1) ;

% Creación de la máscara de ceros
for i= 1:1:w
    for j= 1:1:e

        Cero (i,j)=0;

    end
end

% Sustitución del valor 0 por 2*pi según el rectángulo marcado
C=Cero;
C (Y1:Y2,X1:X2)=-2*pi;
imshow (C, [ ] ) ;

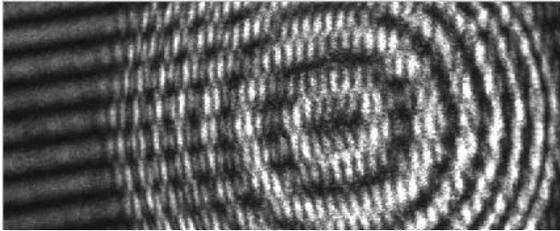
figure (3)
subplot (1,2,1) ;
```



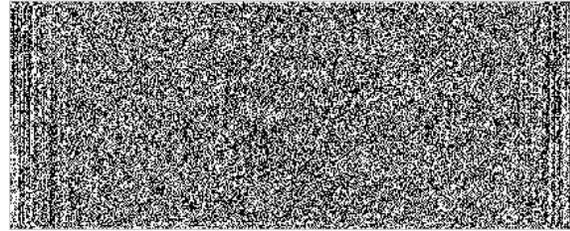
```
SUM=trans2+C;  
imshow(SUM, [ ]);  
  
subplot(1,2,2);  
mesh(SUM);  
  
% "save" guarda los datos en la carpeta de MATLAB  
save escalon SUM -ASCII -tabs;  
% "escalon" nombre con que se guarda  
% "SUM" Nombre de la matriz de la que se guardan los datos  
% "-ASCII -tabs" lo guarda en formato ASCII con tabulaciones ente datos
```

## Anexo 6

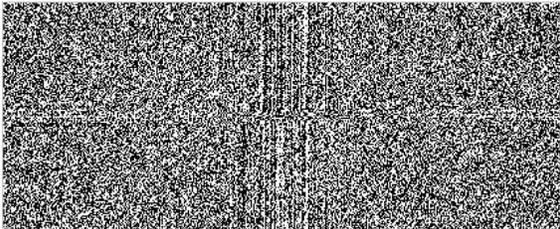
**Programa 4. Programa para filtrar franjas con transformada de Fourier.**



**Figura 9.6.1.** Imagen Original.



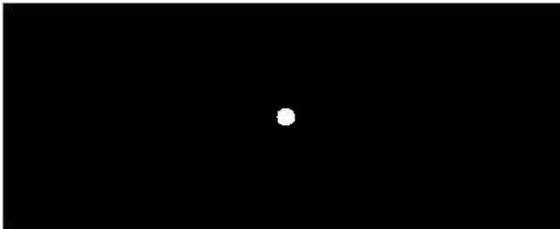
**Figura 9.6.2.** Transformada de Fourier (fft2).



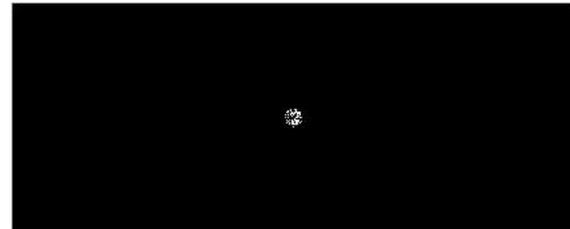
**Figura 9.6.3.** Composición de la frecuencia de Fourier al centro de la imagen (fftshift).



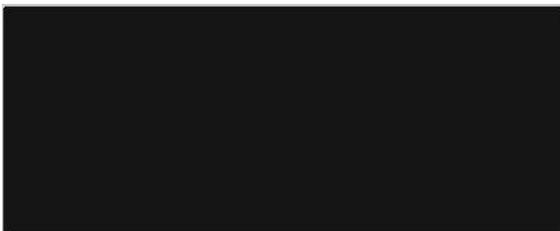
**Figura 9.6.4.** Logaritmo Natural. Aplicado para observar mejor el fftshift.



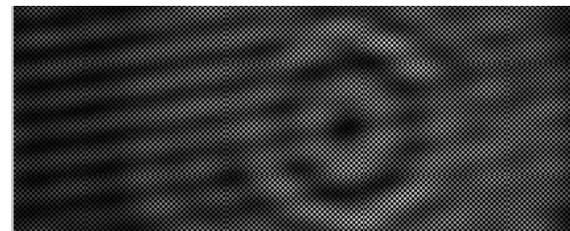
**Figura 9.6.5.** Creación de la Máscara.



**Figura 9.6.6.** Multiplicación de la máscara por la transformada.



**Figura 9.6.7.** Inverso de fftshift (ifftshift).



**Figura 9.6.8.** Transformada inversa de Fourier en 2 dimensiones (ifft2). Esta es la imagen mejorada con relación a la mostrada en la Figura 2.4.10.

**Programa 5. Programa para simular franjas de interferencia con una visibilidad dada y ruido metiendo transformada de Fourier.**

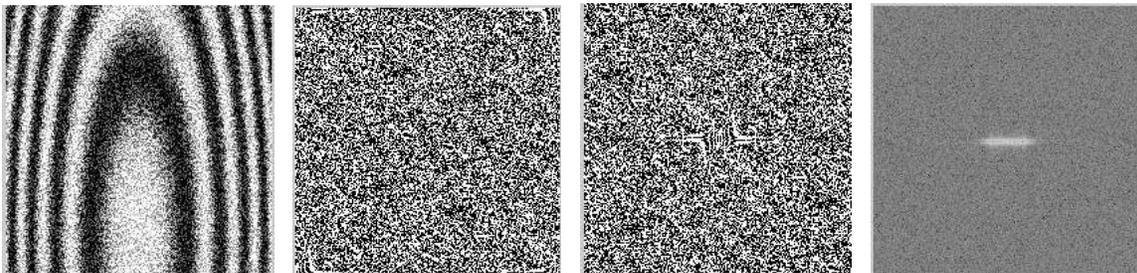
```

Command Window
New to MATLAB? Watch this Video, see Demos, or read Getting Started.

Recuerda lo siguiente:
>El Valor de 0 es para ver franjas opacas
>El Valor de 1 es para ver franjas bien definidas
Elige un valor entre estos rangos

¿Qué Visibilidad de Franjas deseas?:.5
  
```

**Figura 9.6.9.** Datos que pide el programa y restricciones que arroja.



**Figura 9.6.10.**    **Figura 9.6.11.**    **Figura 9.6.12.**    **Figura 9.6.13.**



**Figura 9.6.14.**    **Figura 9.6.15.**    **Figura 9.6.16.**    **Figura 9.6.17.**

**Figura 9.6.10.** Simulación de la imagen agregándole ruido y visibilidad de 0.5.

**Figura 9.6.11.** Transformada de Fourier (fft2).

**Figura 9.6.12.** Composición de la frecuencia de Fourier al centro de la imagen (fftshift).

**Figura 9.6.13.** Logaritmo Natural. Aplicado para observar mejor el fftshift.

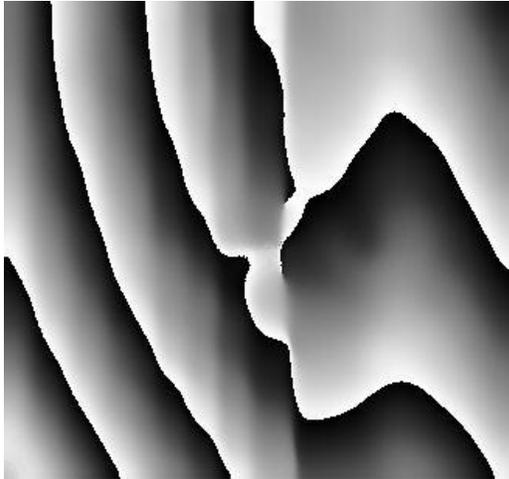
**Figura 9.6.14.** Creación de la Máscara.

**Figura 9.6.15.** Multiplicación de la máscara por la transformada.

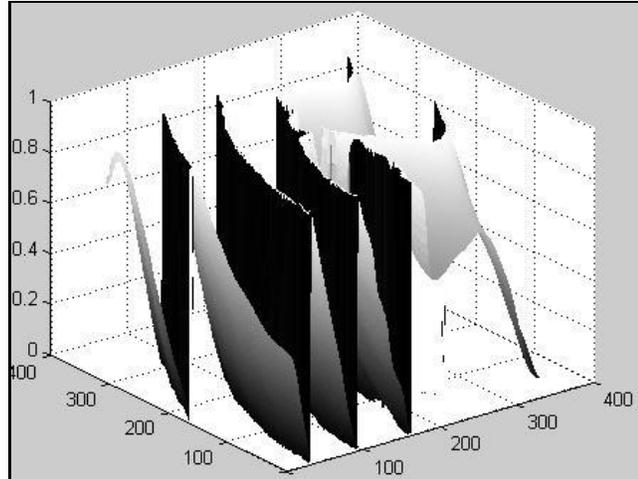
**Figura 9.6.16.** Inverso de fftshift (ifftshift).

**Figura 9.6.17.** Transformada inversa de Fourier en 2 dimensiones (ifft2). Esta es la imagen mejorada con relación a la mostrada en la Figura 2.6.10.

**Programa 6. Método de los 4 pasos para la Fase envuelta.**

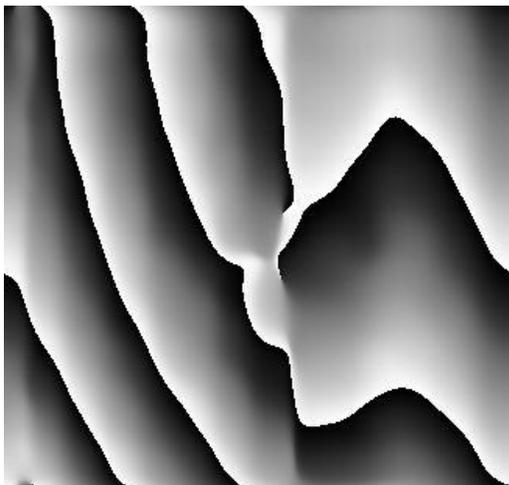


**Figura 9.6.18.** Fase Envuelta mostrada con imshow.

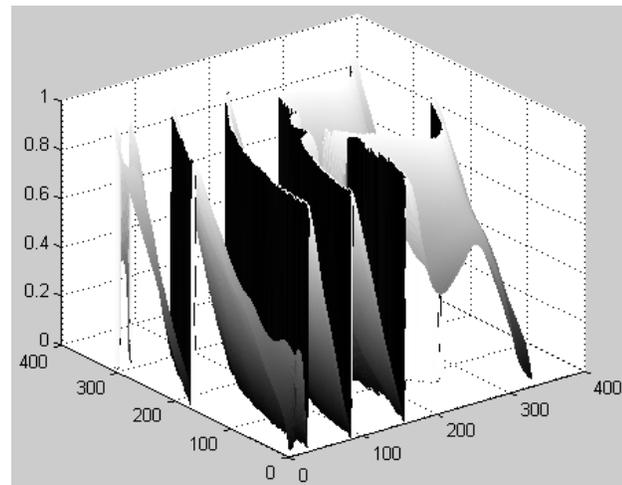


**Figura 9.6.19.** Fase Envuelta mostrada con mesh.

**Programa 7. Método de 4 pasos para calcular la Fase envuelta con filtro de franjas usando transformada de Fourier.**



**Figura 9.6.20.** Fase Envuelta mostrada con imshow.



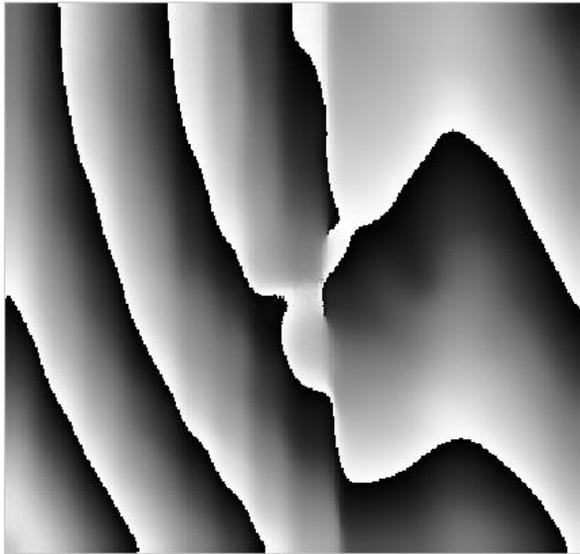
**Figura 9.6.21.** Fase Envuelta mostrada con mesh.

**Programa 8. Programa para leer datos.**

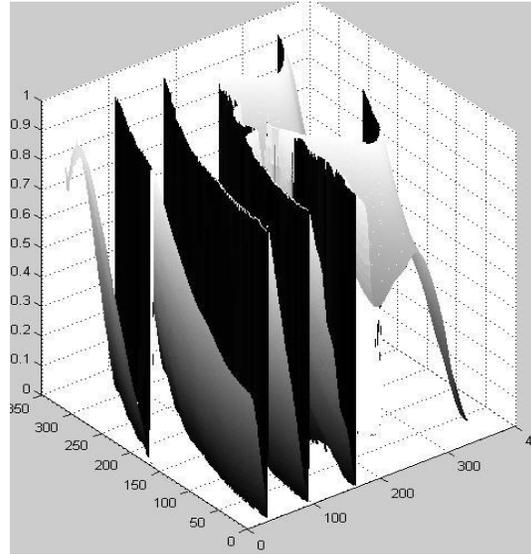
El programa 8 no demuestra nada grafico, solo lee datos que después serán utilizados.

**Programa 9. Programa para filtrar imágenes con la función "average" de MATLAB.**

**Kernel o Matriz de 3x3 con 100 iteraciones.**

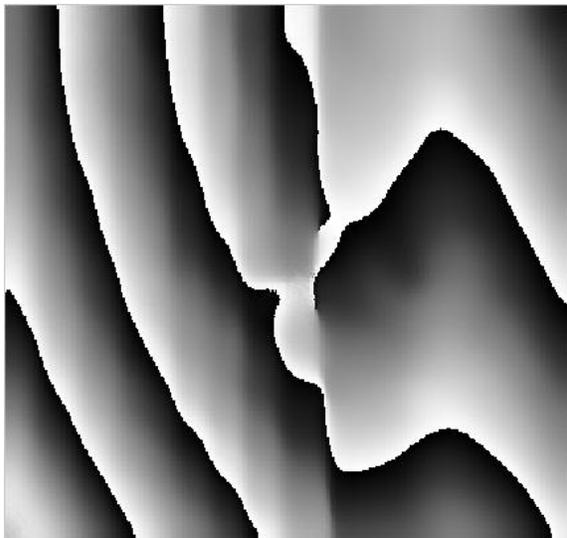


**Figura 9.6.22.** Fase Envuelta mostrada con imshow.

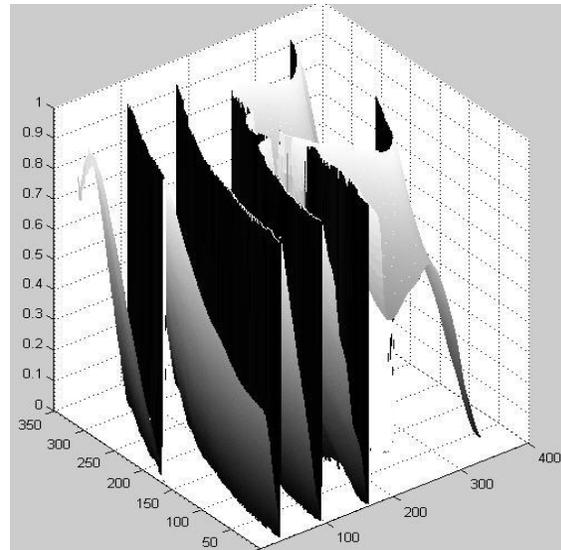


**Figura 9.6.23.** Fase Envuelta mostrada con mesh.

**Kernel o Matriz de 3x3 con 800 iteraciones.**

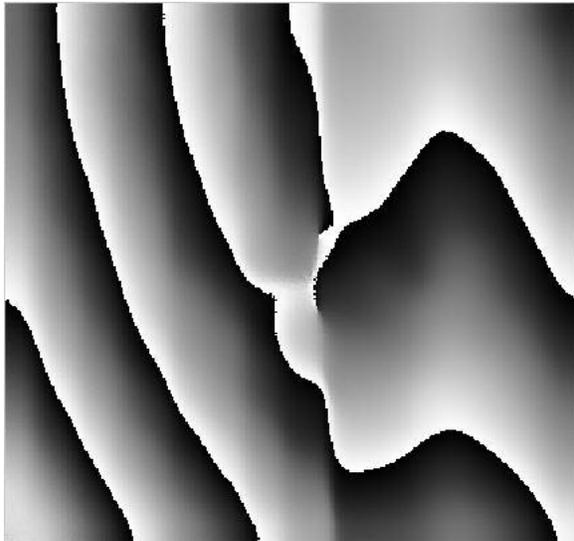


**Figura 9.6.24.** Fase Envuelta mostrada con imshow.

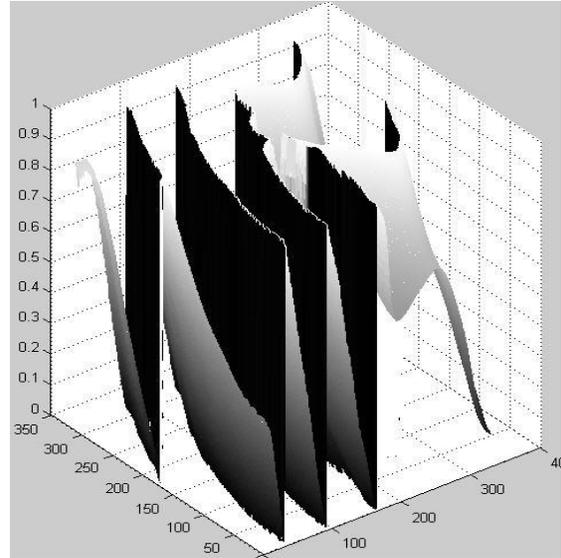


**Figura 9.6.25.** Fase Envuelta mostrada con mesh.

**Kernel o Matriz de 20x20 con 100 iteraciones**

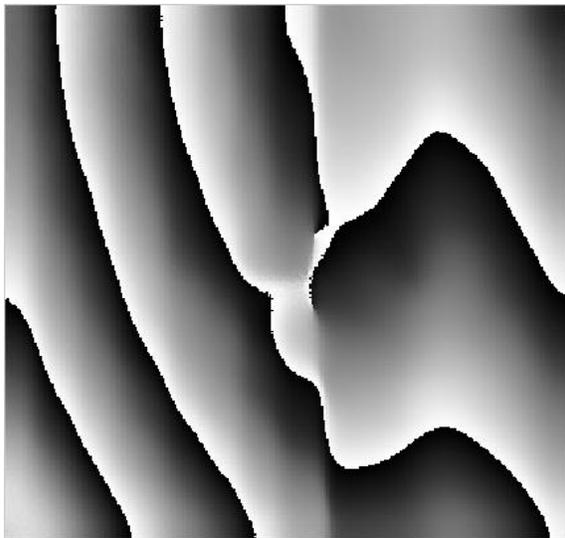


**Figura 9.6.26.** Fase Envuelta mostrada con imshow.

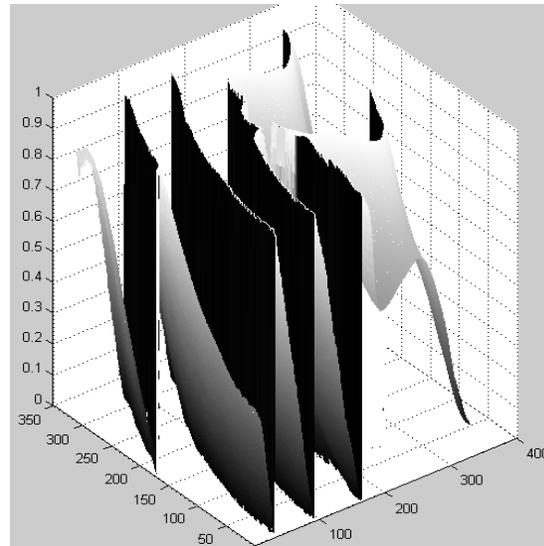


**Figura 9.6.27.** Fase Envuelta mostrada con mesh.

**Kernel o Matriz de 20x20 con 800 iteraciones.**

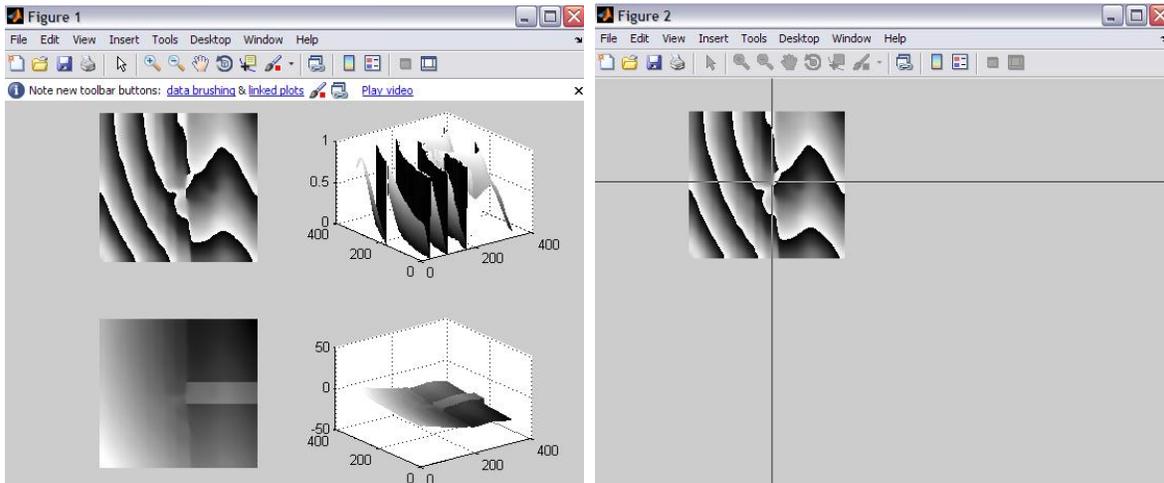


**Figura 9.6.28.** Fase Envuelta mostrada con imshow.



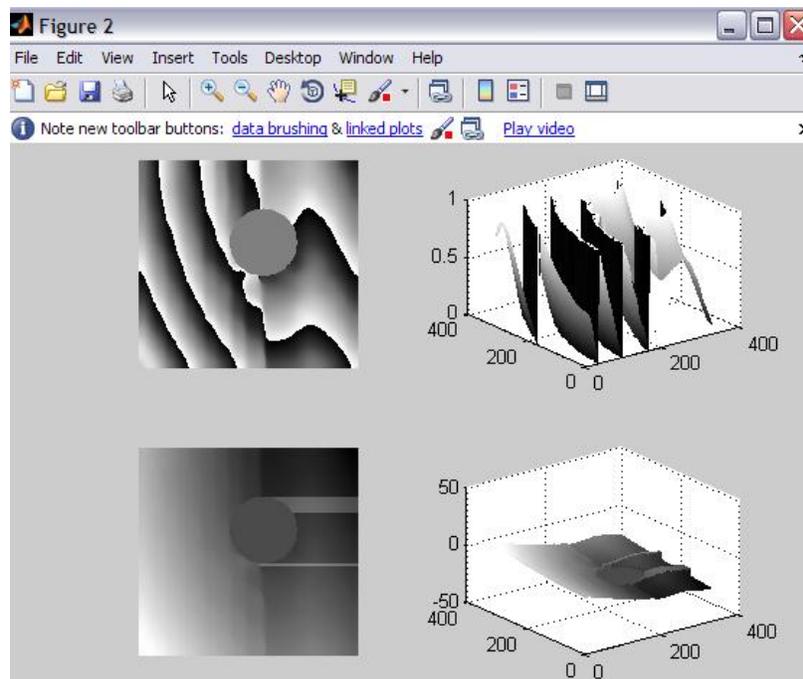
**Figura 9.6.29.** Fase Envuelta mostrada con mesh.

**Programa 10. Método de los 4 pasos para la Fase envuelta y desenvuelta con mascara circular, otorgando el centro con un clic.**



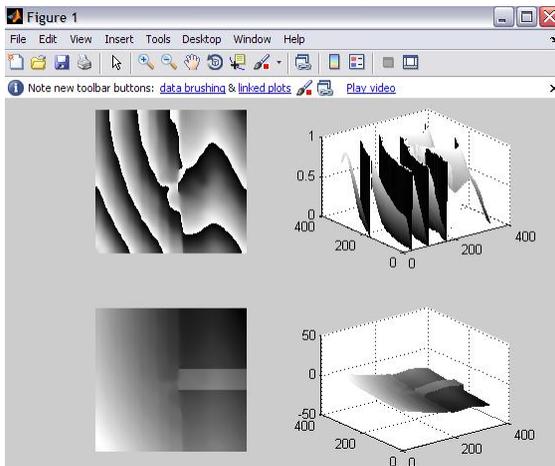
**Figura 9.6.30.** Fase Envuelta (imágenes de arriba) y desenveltas (imágenes de abajo) mostradas con imshow y mesh.

**Figura 9.6.31.** Aplicación del clic para colocación de la máscara.

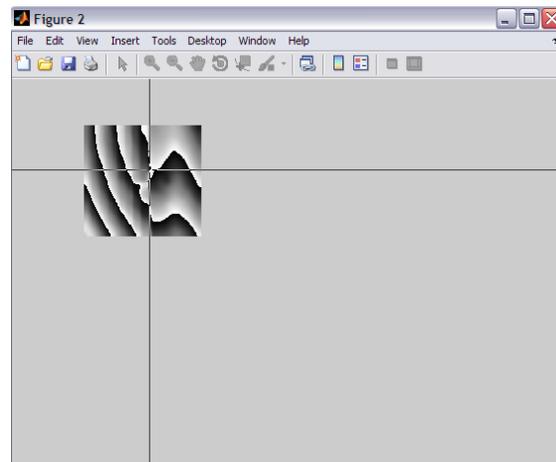


**Figura 9.6.32.** Aplicación de la máscara para corrección de los datos. Fase Envuelta (imágenes de arriba) y desenveltas (imágenes de abajo) mostradas con imshow y mesh.

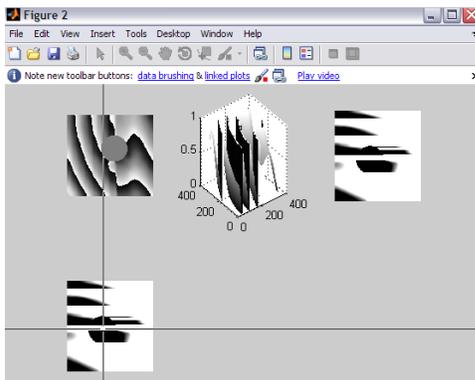
**Programa 11. Método de los 4 pasos para la Fase envuelta y desenvuelta con creación de máscaras entre desenveltas.**



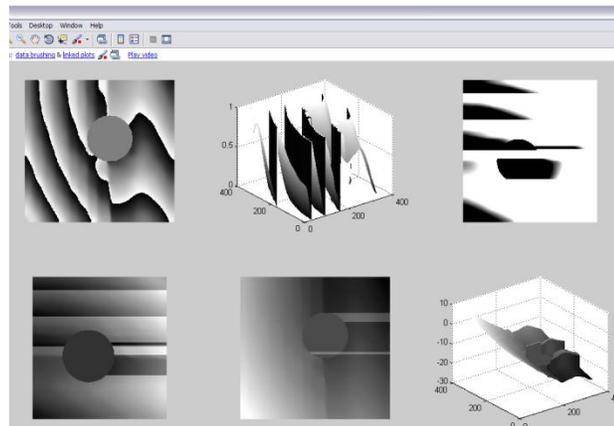
**Figura 9.6.33.** Fase Envuelta (imágenes de arriba) y desenvueltas (imágenes de abajo) mostradas con imshow y mesh.



**Figura 9.6.34.** Aplicación del clic para colocación de la primera máscara.

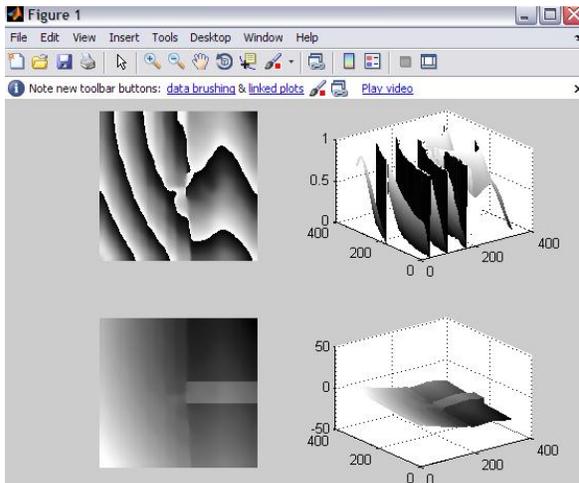


**Figura 9.6.35.** Segundo clic para la colocación de la segunda máscara.

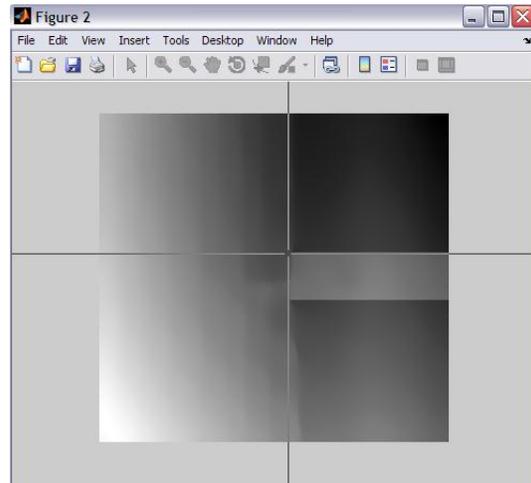


**Figura 9.6.36.** Aplicación de los dos clics, las dos mascarar y corrección de los datos.

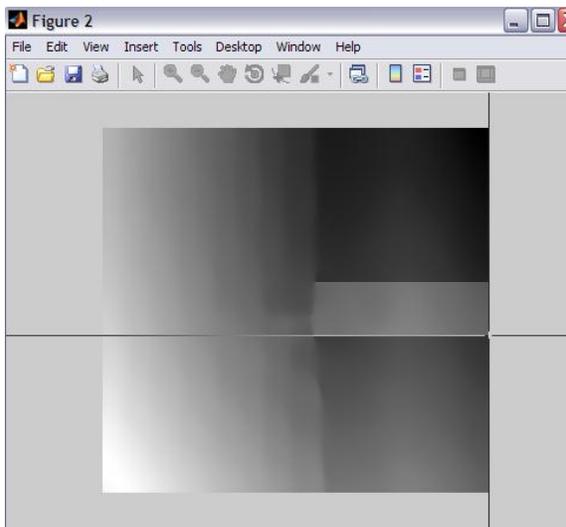
**Programa 12. Método de los 4 pasos para la Fase envuelta y desenvuelta con inserción, de 2 clics, de una máscara para corregir la desenvuelta.**



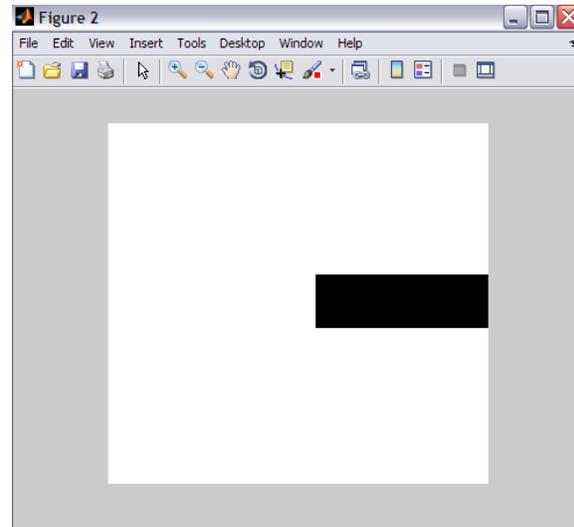
**Figura 9.6.37.** Fase Envuelta (imágenes de arriba) y desenvueltas (imágenes de abajo) mostradas con imshow y mesh.



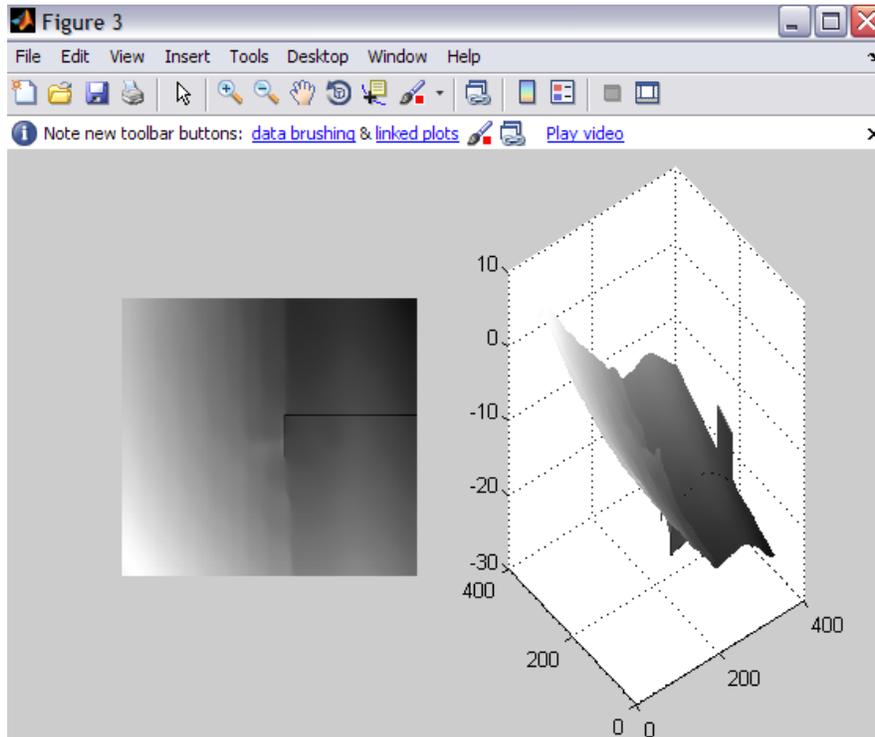
**Figura 9.6.38.** Aplicación del primer clic para colocación de la máscara rectangular.



**Figura 9.6.39.** Aplicación del segundo clic para colocación de la máscara rectangular.



**Figura 9.6.40.** Mascara rectangular.

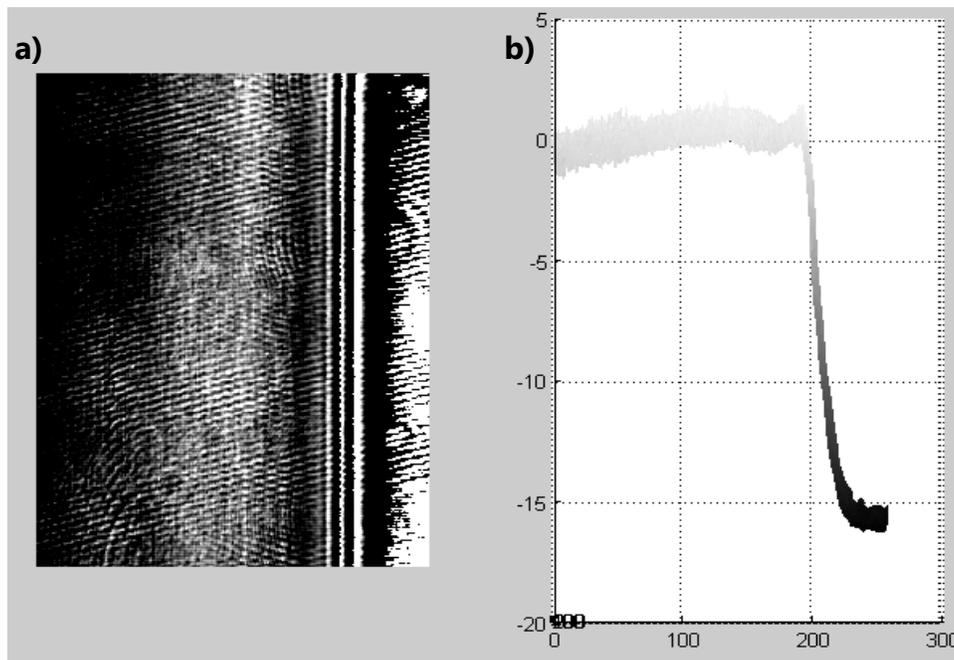


**Figura 9.6.41.** Aplicación de la máscara rectangular para corrección de los datos. Fase Desenvuelta mostrada con imshow y mesh.

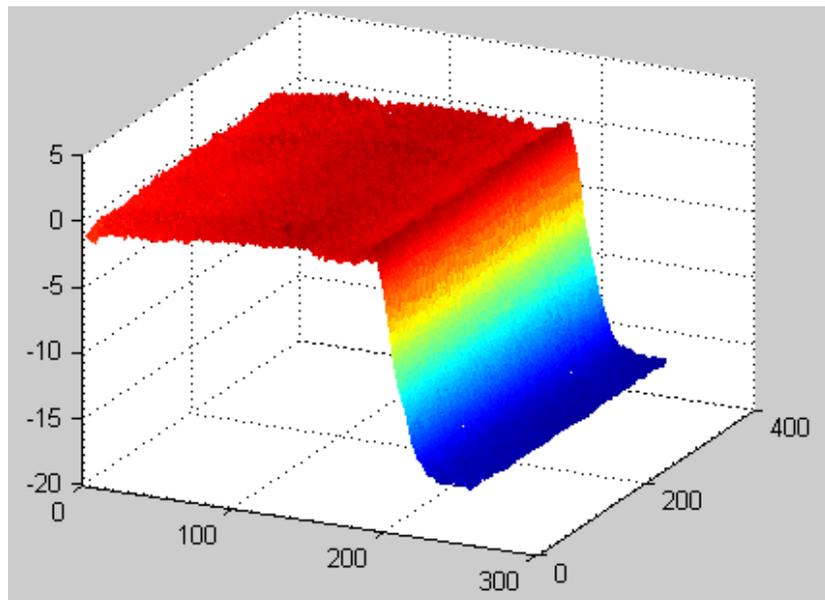
## Anexo 7

**Resultados del Escalón de 1.005 micrómetros.**

**Lado Derecho**

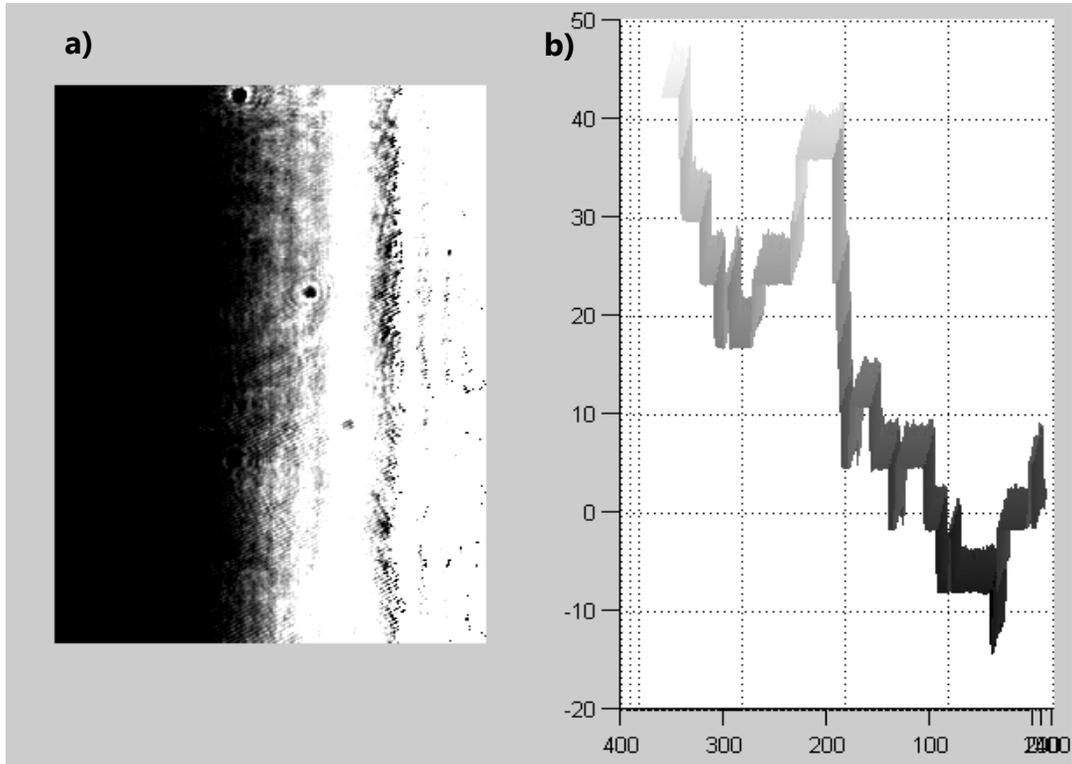


**Figura 9.7.1.** a) Fase Envuelta por corrimiento de fase y b) Fase Desenvuelta por el método simple.

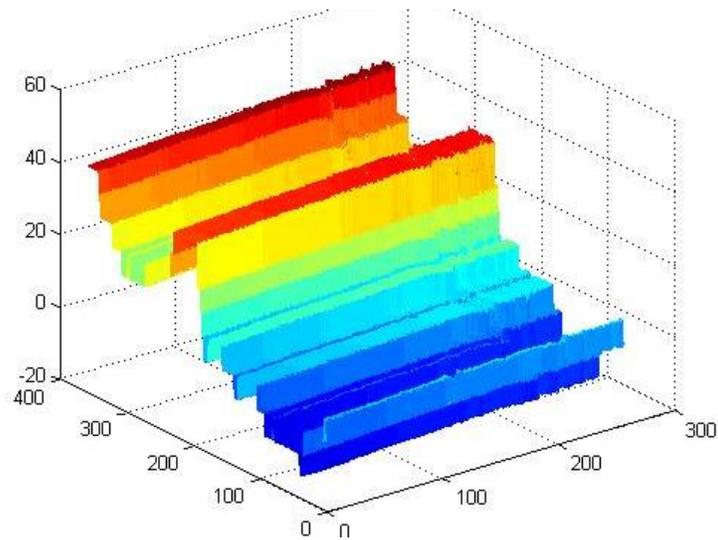


**Figura 9.7.2.** Vista del Escalón en 3-D de la fase desenvuelta.

**Lado Izquierdo**



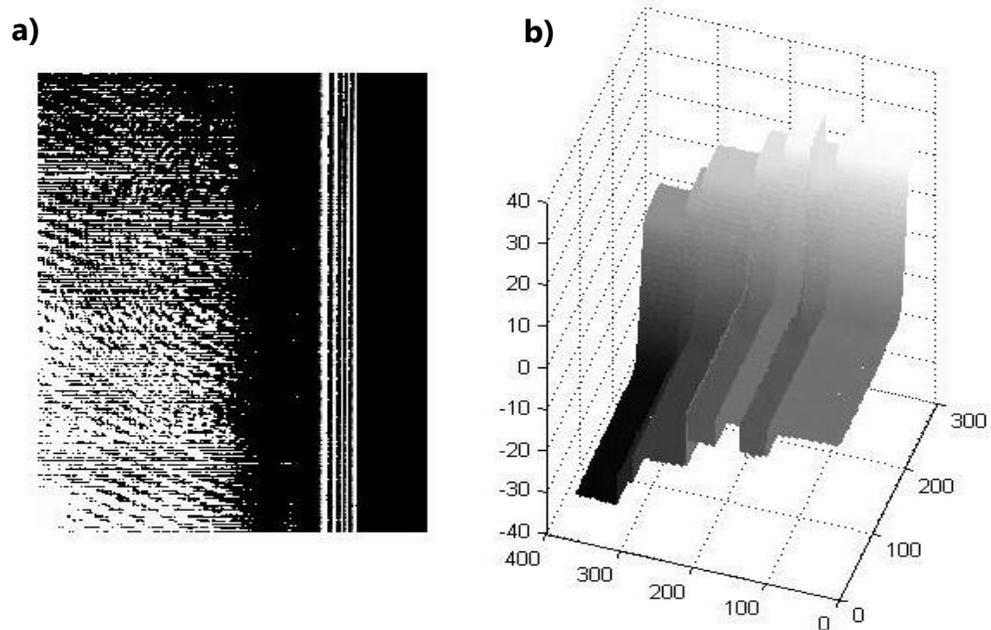
**Figura 9.7.3.** a) Fase Envuelta por corrimiento de fase y b) Fase Desenvuelta por el método simple.



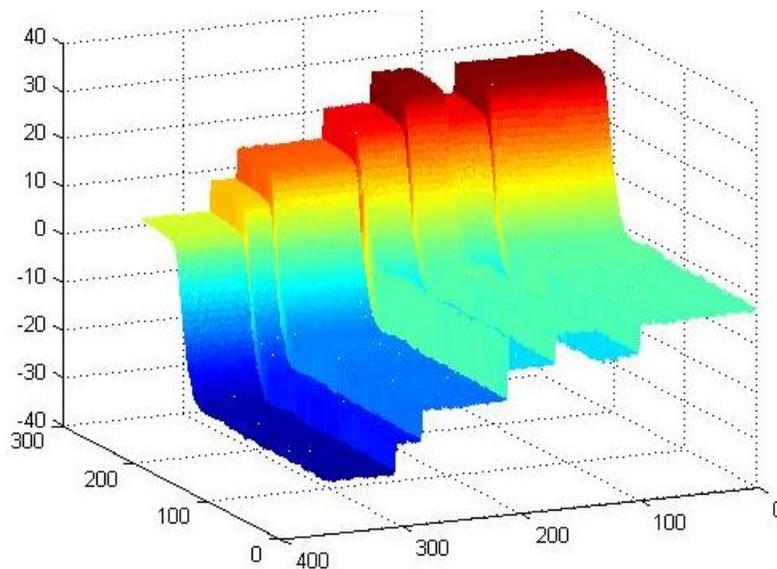
**Figura 9.7.4.** Vista del Escalón en 3-D de la fase desenvuelta.

### Resultados del Escalón de 2.002 micrómetros.

### Lado Derecho

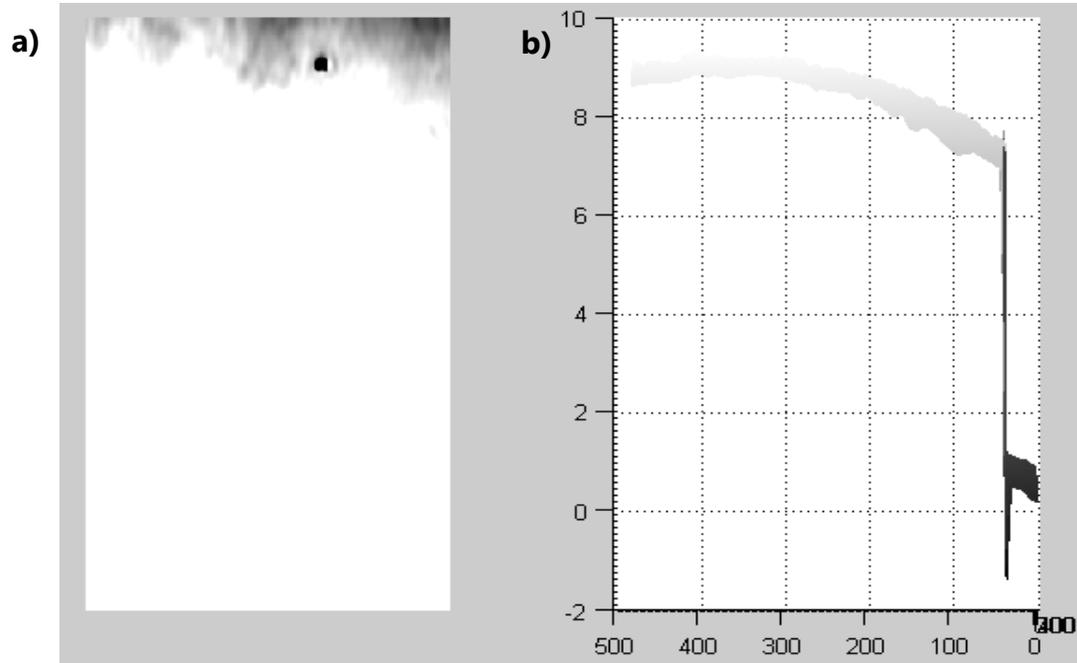


**Figura 9.7.5.** a) Fase Envuelta por corrimiento de fase y b) Fase Desenvuelta por el método simple.

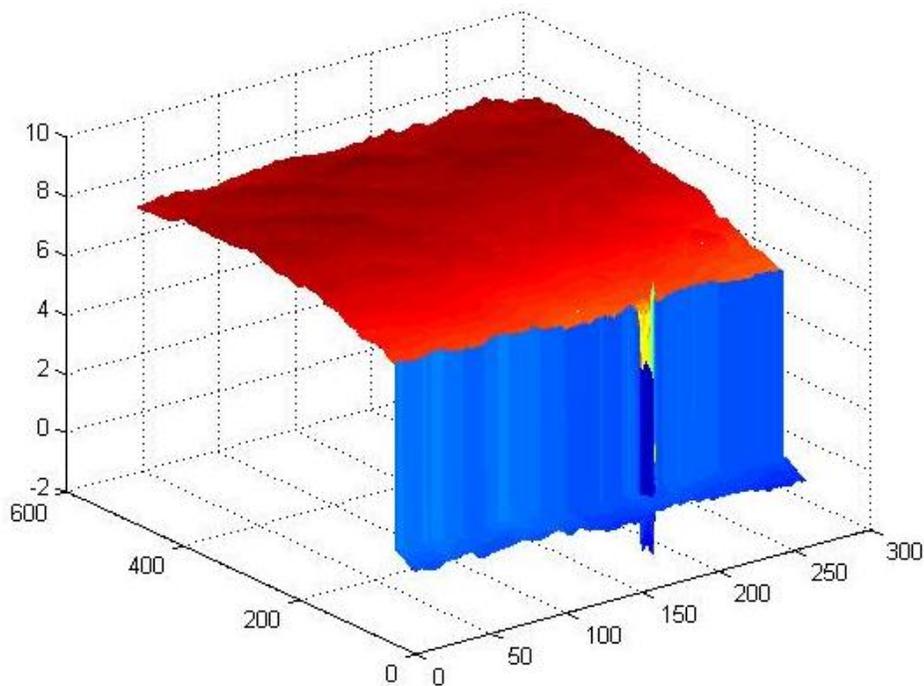


**Figura 9.7.6.** Vista del Escalón en 3-D de la fase desenvuelta.

### Lado Izquierdo



**Figura 9.7.7.** a) Fase Envuelta por corrimiento de fase y b) Fase Desenvuelta por el método simple.



**Figura 9.7.8.** Vista del Escalón en 3-D de la fase desenvuelta.

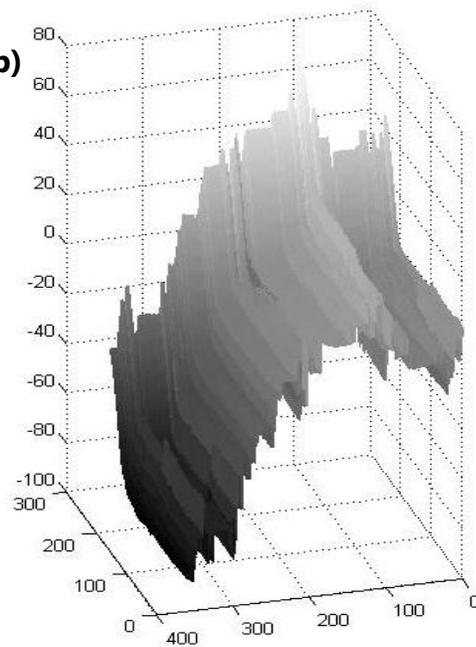
**Resultados del Escalón de 3.003 micrómetros.**

### Lado Derecho

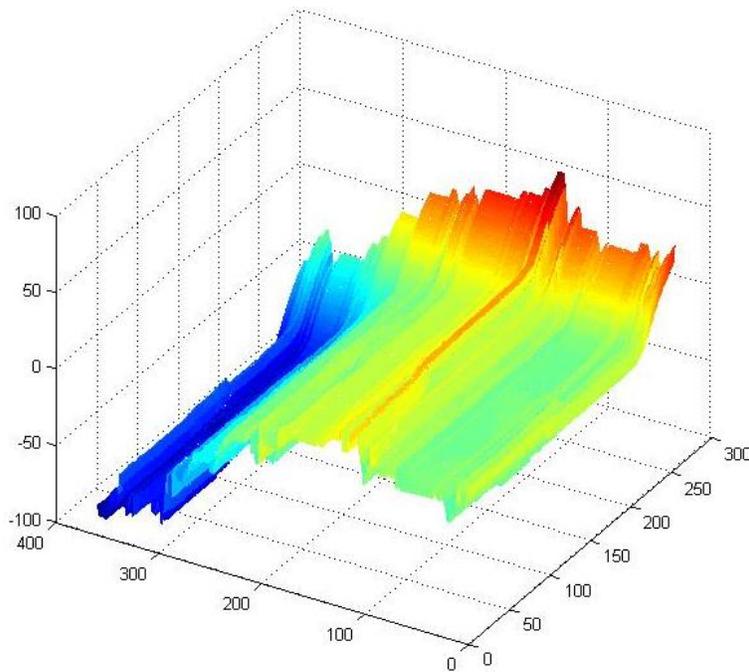
a)



b)

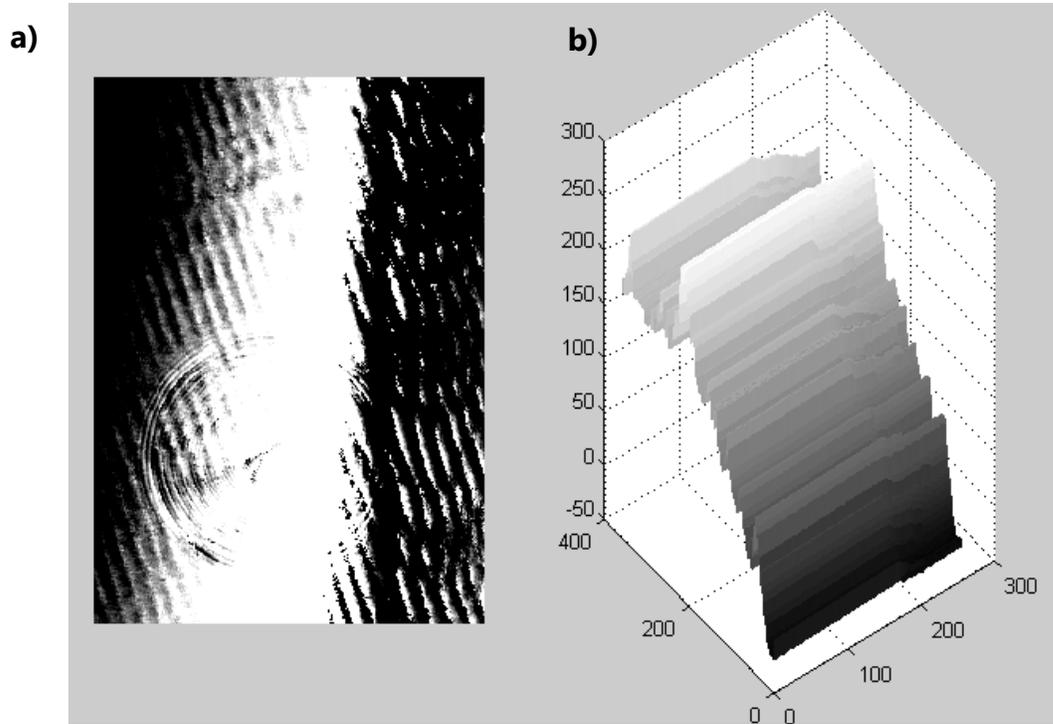


**Figura 9.7.9.** a) Fase Envuelta por corrimiento de fase y b) Fase Desenvuelta por el método simple.

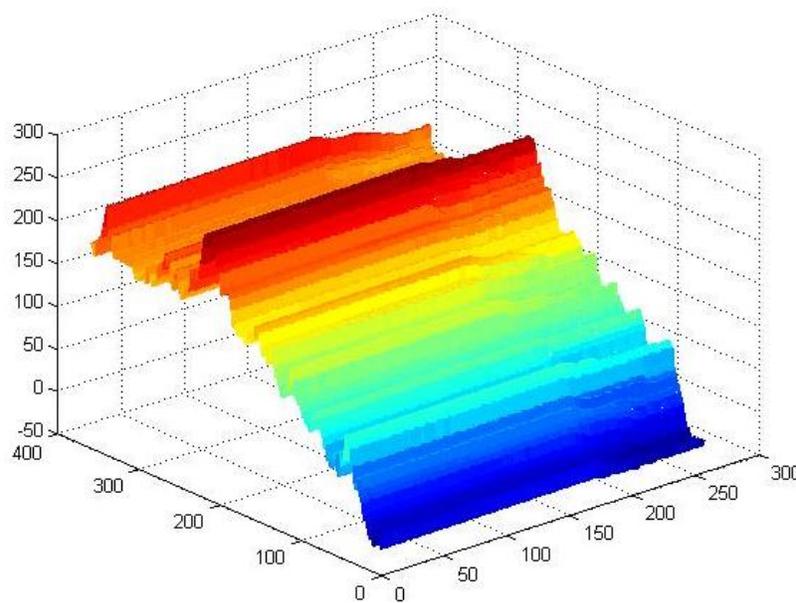


**Figura 9.7.10.** Vista del Escalón en 3-D de la fase desenvuelta.

### Lado Izquierdo



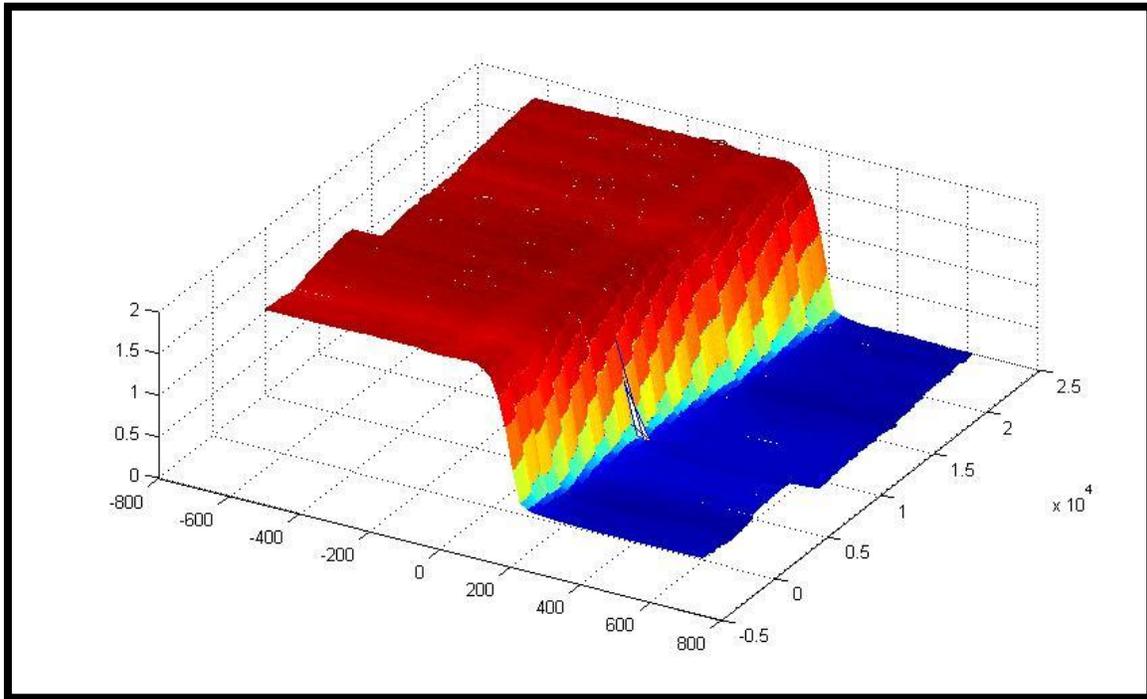
**Figura 9.7.11.** a) Fase Envuelta por corrimiento de fase y b) Fase Desenvuelta por el método simple.



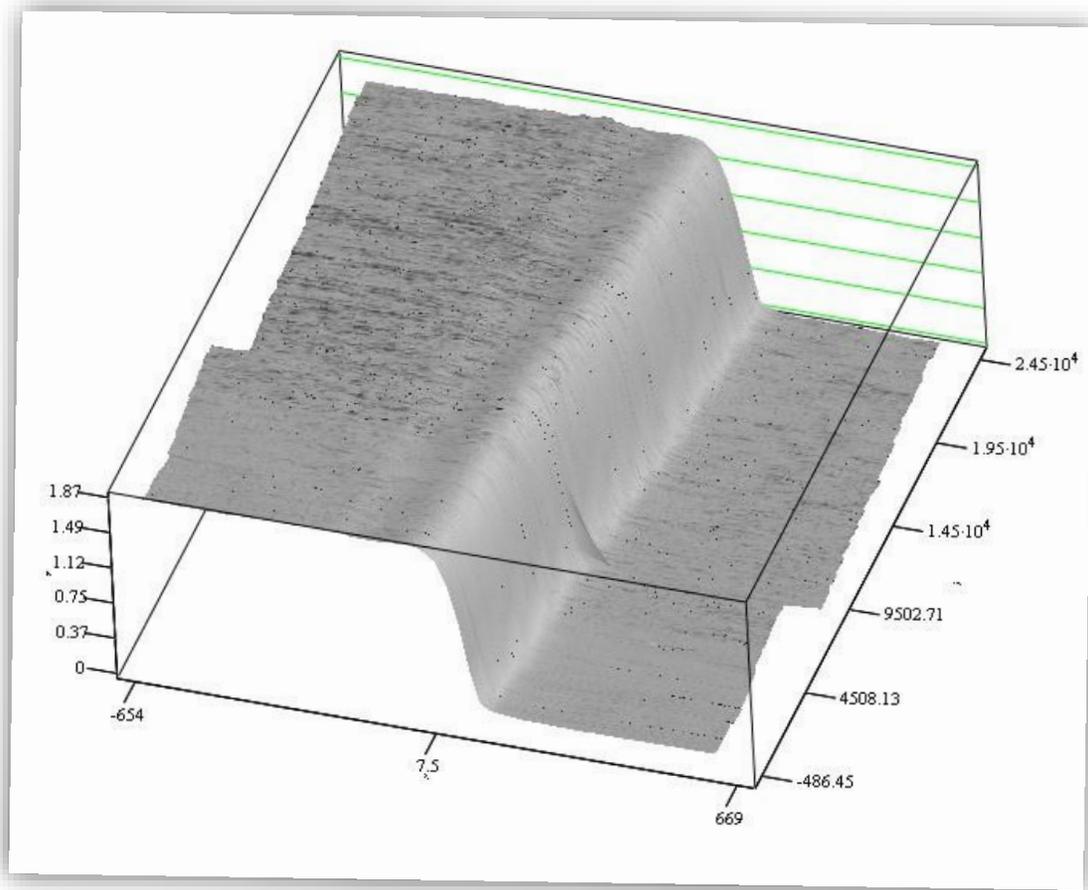
**Figura 9.7.12.** Vista del Escalón en 3-D de la fase desenvuelta.

## Anexo 8

**Resultado Final del procesamiento manual con Stitching.**



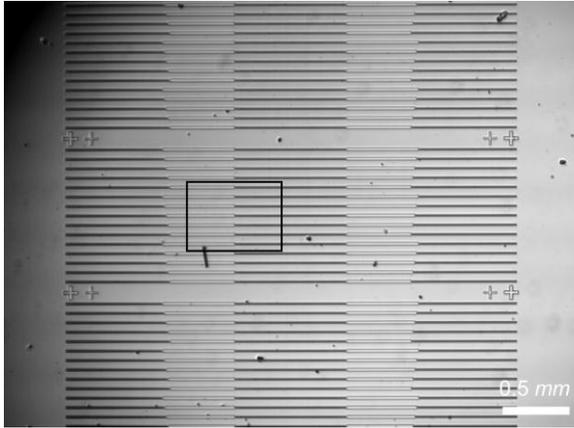
**Figura 9.8.1.** Grafica de todas las imágenes obtenidas a través del escalón de 2.002 micrómetros en su lado derecho mediante MATLAB.



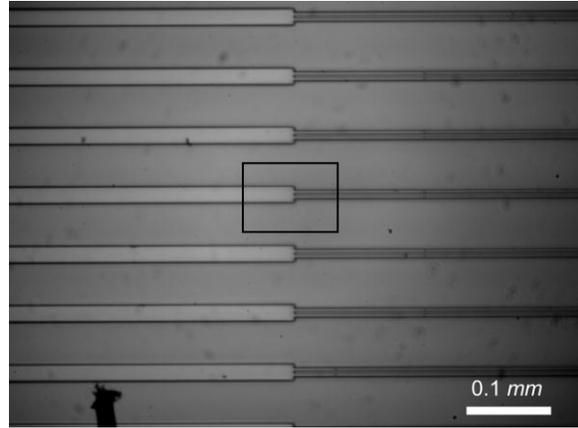
**Figura 9.8.2.** Grafica de todas las imágenes obtenidas a través del escalón de 2.002 micrómetros en su lado derecho mediante MATCAD. Aquí se aprecia mejor la altura promedio, que nos resulto en 1.87 micrómetros.

## Anexo 9

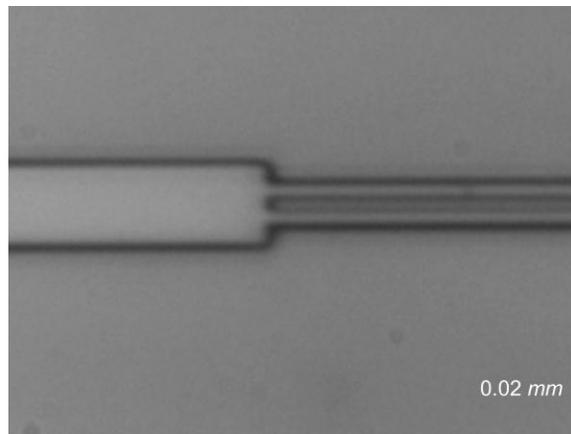
### Vista del Microscopio.



**Figura 9.9.1.** Vista a 0.5 mm.

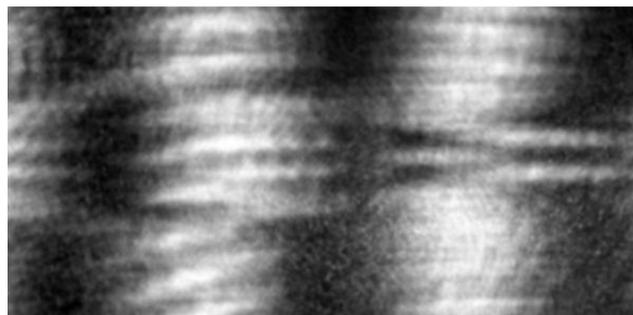


**Figura 9.9.2.** Vista a 0.1 mm.



**Figura 9.9.3.** Vista a 0.02 mm.

**Imágenes Obtenidas por el corrimiento de fase y el proceso de las mismas.**



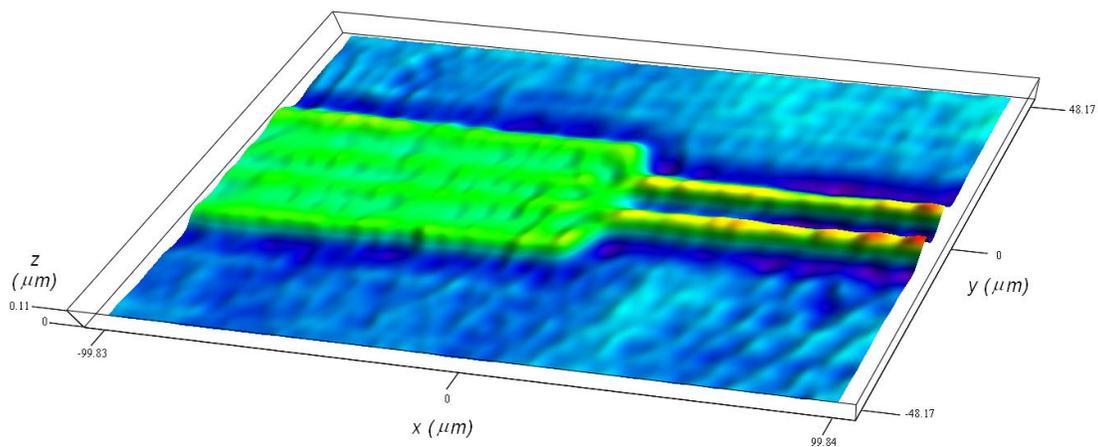
**Figura 9.9.4.** Interferograma del microimpreso colocado como espejo de prueba en un Michelson.



**Figura 9.9.5.** Fase envuelta del microimpreso aplicando corrimiento de fase.



**Figura 9.9.6.** Fase desenvuelta del microimpreso aplicando el método simple.



**Figura 9.9.7.** Gráfico en 3-D del microimpreso. Nótese la altura (100 nm promedio).



## 10. OBSEVACIONES

- ✚ Las imágenes que se obtienen siempre tienen un defecto ó irregularidad en el centro de la imagen, esto por el funcionamiento del Objetivo de Microscopio Interferencial tipo Mirau que contiene en su interior un espejo el cual produce la interferencia pero a la vez nos crea una sombra donde no se obtienen datos.
- ✚ Cabe mencionar también que las imágenes tenían algo de filtraje por parte del programa en LABVIEW que realizaba la toma de las imágenes.
- ✚ Por otro parte, todos los datos obtenidos por el cálculo de las envueltas y desenvueltas no son mostrados por motivo de que son muchos datos para mostrar (matrices de 328x310), por lo que solo se enseñan las imágenes y graficas.
- ✚ El Stitching es un proceso que se necesita se haga en automático y que podría ser un trabajo posterior al que llegue después de nosotros, obvio en el ámbito de la programación.

## 11. CONCLUSIÓN

Con este trabajo nos podemos dar cuenta que no es nada simple poder conocer detalladamente la topografía de un objeto y que para esto existen varias métodos para poder realizarlas.

No están fácil abrir los ojos hacia el mundo nanométrico ya que no nos damos una verdadera idea de su alcance, los cuales son muchos y que es un punto de estudio aun en desarrollo y constante crecimiento. Podemos estar seguros que en los años por venir arrojara muchos avances no solo en el área de la óptica o la mecánica, sino que se expande a todas las ramas científicas.



## 12. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] <http://www.cio.mx/>. ARRIOLA NECCHI, CAROLINA. 2002. Disponible en: <[http://www.cio.mx/investigacion06/mo\\_i\\_nodes.htm](http://www.cio.mx/investigacion06/mo_i_nodes.htm)>

[2] TEMA 12: ÓPTICA FÍSICA II: INTERFERENCIAS. [en línea]; [Fecha de consulta: 15 Agosto 2009]. Disponible en: <[http://mural.uv.es/miyallon/fisicageneral2/Tema12\\_c.pdf](http://mural.uv.es/miyallon/fisicageneral2/Tema12_c.pdf)>

[3] GÁSVIK Kjell J. *Optical Metrology*. Third Edition. Copyright © 2002 John Wiley & Sons, Ltd. [360]p. ISBN: 0-470-84300-4

[4] Reconstrucción Topográfica Combinando Simultáneamente Métodos de Luz Monocromática con Luz Blanca por PLATA, G. Arturo [et al.]. [en línea]. Universidad Industrial de Santander y Escuela de Ciencia Básica, Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombia. [Fecha de consulta: 15 Agosto 2009]. Disponible en: <<http://www.accefyn.org.co/PubliAcad/Encuentro/Int-04-o.pdf>>

[5] DETERMINACIÓN DE FORMAS DE PELÍCULAS DELGADAS SEMICONDUCTORAS ( $\text{SiO}_2$ ) POR MÉTODOS INTERFEROMETRICOS EN LUZ POLICROMÁTICA por PLATA, G. Arturo [et al.]. [en línea]. Universidad Industrial de Santander y Escuela de Ciencia Básica, Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombia. [Fecha de consulta: 15 Agosto 2009]. Disponible en: <[http://www.accefyn.org.co/PubliAcad/Encuentro/Full\\_text/interferometria/Int-11-m.pdf](http://www.accefyn.org.co/PubliAcad/Encuentro/Full_text/interferometria/Int-11-m.pdf)>

[6] DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS DE TEXTURA LOCALES EN MUESTRAS MATERIALES UTILIZANDO UN SISTEMA CAM INTERFEROMÉTRICO. [en línea]. Colombia, 2002- [Fecha de consulta: 17 Agosto 2009]. Disponible en: <[http://www.rcf-online.org/vol34\\_1/articulos/pdf/3401187.pdf](http://www.rcf-online.org/vol34_1/articulos/pdf/3401187.pdf)>



[7] García Gómez, R. Carlos. Apuntes de Matlab: Programación y Graficación con MatLab. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, Octubre de 2005.

[8] García de Jalón, Javier, Rodríguez, José Ignacio y Brazález, Alfonso. Aprende Matlab 6.1 como si estuviera en primero. Madrid, Octubre 2001. [Fecha de consulta: 20 Agosto 2009]. Disponible en: <<http://www.diquima.upm.es/recursos/manuales/matlab61pro.pdf> >

[9] Guía de uso de MATLAB. [Fecha de consulta: 20 Agosto 2009]. Disponible en: <<http://mit.ocw.universia.net/18.06/f02/related-resources/matlab.pdf>>

[10] <http://www.microscopyu.com/>. MICROSCOPYU, THE SOURCE FOR MICROSCOPY EDUCATION. 2000-2009. [en línea]. Disponible en: <<http://www.microscopyu.com/articles/interferometry/twobeam.html>>

[11] Ramírez, Salvador. Matlab. [en línea]. 5 de marzo de 2002. [Fecha de consulta: 5 Septiembre 2009]. Disponible en: <<http://www.profc.udec.cl/~sram/manuals/mitutorial.pdf>>

[12] Cuevas Jimenez, Erik Valdemar y Zaldivar Navarro, Daniel. Visión por Computador utilizando MatLAB Y el Toolbox de Procesamiento Digital de Imágenes. [en línea]. [Fecha de consulta: 10 Septiembre 2009]. Disponible en: <<http://www.scribd.com/doc/23371/Procesamiento-de-imagenes-con-Matlab?autodown=pdf>>

[13] Universidad de Jaén, Departamento de Ingeniería electrónica, Telecomunicación y Automática, Área de Ingeniería de Sistemas y Automática. Practica 2 - Reducción del ruido en una imagen digital. [en línea]. [Fecha de consulta: 10 Septiembre 2009]. Disponible en: <<http://www4.ujaen.es/~satorres/practicas/practica2.pdf>>



[14] Costa, Diego. Transformada Discreta de Fourier. [en línea]. [Fecha de consulta: 11 Septiembre 2009]. Disponible en: <<http://dsp1.materia.unsl.edu.ar/Transformada%20Discreta%20de%20Fourier%20Transparencias.pdf>>

[15] MATLAB ® C++ Math Library, The Language of Technical Computing. [en línea]. [Fecha de consulta: 11 Septiembre 2009]. Disponible en: <[http://www.stat.purdue.edu/~zhang305/pubDoc/IT/cppmath\\_ref2b.pdf](http://www.stat.purdue.edu/~zhang305/pubDoc/IT/cppmath_ref2b.pdf)>

[16] Malacara, Daniel, Servín, Manuel y Malacara, Zacarías. Interferogram Analysis for Optical Testing. Published in 2005 by CRC Press Taylor & Francis Group. Second Edition. Centro de Investigaciones de Óptica León, México

[17] Gonzalez, Rafael C., Woods, Richard E. y L. Eddins, Steven. Digital Image Processing Using Matlab.

[18] WIKIPEDIA. [en línea]. Disponible en: <<http://es.wikipedia.org/wiki/Stitching>>

[19] WIKIPEDIA. [en línea]. Disponible en: <[http://en.wikipedia.org/wiki/Mach-Zehnder\\_interferometer](http://en.wikipedia.org/wiki/Mach-Zehnder_interferometer)>