

CAPITULO I

"CARACTERIZACION DEL PROYECTO"

1.1 INTRODUCCION

Los orígenes de la tecnología óptica se remontan a la antigüedad. En Éxodo 38:8 (ca. 1200 a. C.) se relata cómo, mientras preparaba el arca y el tabernáculo, Besabel remoldeaba «los espejos de las mujeres» en un lavabo de latón (una vasija de ceremonia). Los primeros espejos se hicieron de cobre pulido, bronce y más tarde de especulum una aleación de cobre rica en estaño. Los filósofos griegos, Pitágoras, Demócrito, Empédocles, Platón, Aristóteles y otros desarrollaron varias teorías sobre la naturaleza de la luz (la del último mencionado era muy similar a la teoría del éter del siglo diecinueve). Se conocían tanto la propagación rectilínea de la luz, como la ley de reflexión enunciada por Euclídes (300 a. C.) en su libro Catóptrica. (1)

La Óptica es la rama de la física que estudia el comportamiento de la luz, abarca el estudio de la reflexión, la refracción, las interferencias, la difracción, la manipulación, la interacción de la luz con la materia, entre otras. (2)

El ser humano entra en contacto con la óptica desde el momento en que sus ojos ven la primera luz, al momento de nacer.

James Clerk Maxwell, uno de los más grandes científicos de la historia, entre muy importantes descubrimientos demostró que la luz era una parte del espectro electromagnético, es decir que difiere con las demás ondas (como pueden ser ondas de radio, microondas, rayos ultravioleta, infrarrojos) solo en su longitud de onda (distancia entre cresta y cresta de la onda)

Luz es entonces la región del espectro electromagnético visible al ojo.

El espectro electromagnético (figura 1) es la distribución energética del conjunto de las ondas electromagnéticas. Este se extiende desde la radiación de menor longitud de onda, como los rayos gamma y los rayos X, pasando por la luz ultravioleta, la luz visible y los rayos infrarrojos, hasta las ondas electromagnéticas de mayor longitud de onda, como son las ondas de radio. Se cree que el límite para la longitud de onda más pequeña posible es la longitud de Planck mientras que el límite máximo sería el tamaño del Universo aunque formalmente el espectro electromagnético es infinito y continuo.



Figura 1.- Espectro electromagnético.

En óptica se usan unidades de longitud de onda como:

Micra (10^{-6} metros), Ángstrom (10^{-10} metros), o nanómetro (10^{-9} metros).

Los límites del espectro visible (figura 2) no están bien definidos ya que la curva de sensibilidad del ojo tiende a acercarse a los límites pero nunca lo hace, aunque los límites rondan un valor de entre 4300 A y 6900 A.

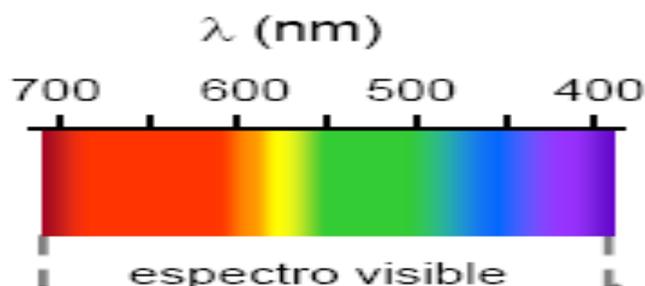


Figura 2.- Diagrama de la parte del Espectro Electromagnético correspondiente al Espectro Visible.

Una onda electromagnética es la forma de propagación de la radiación electromagnética a través del espacio.

Mediante el estudio de la óptica podemos saber también acerca de la generación, propagación y la interacción de las Ondas Electro Magnéticas (OEM).

Las técnicas ópticas no destructivas y sus aplicaciones industriales han jugado un papel muy importante en los últimos años. Esto es debido a que se pueden hacer mediciones sin estar en contacto con los objetos a medir. En adición, es posible hacer la medición en campo completo y casi en tiempo real. Entre las técnicas ópticas no destructivas más importantes encontramos la Interferometría.

La Interferometría se basa en el fenómeno de la interferencia, que podemos producir cuando dos ondas luminosas de exactamente la misma frecuencia se superponen sobre una pantalla. Además de tener la misma frecuencia, estas ondas deben ser sincrónicas, es decir que sus diferencias de fase, y por lo tanto las distancias entre las crestas de ambas ondas, deben permanecer constantes con el tiempo.

Esto es prácticamente posible sólo si la luz de ambas ondas que se interfieren proviene de la misma fuente luminosa. Pero si es solamente una fuente luminosa la que produce la luz, los dos haces luminosos que se interfieren deben generarse de alguna manera del mismo haz. Existen dos procedimientos para lograr esto: denominamos al primero división de amplitud y al segundo división de frente de onda. **(3)**

Usando estos dos métodos básicos se han diseñado una gran cantidad de interferómetros, con los que se pueden efectuar medidas sumamente precisas. La figura 3 muestra dos interferómetros muy comunes, el primero es el sistema de dos rendijas de Young, que produce interferencia por frente de onda y el segundo es el de Michelson, que produce interferencia por división de amplitud.

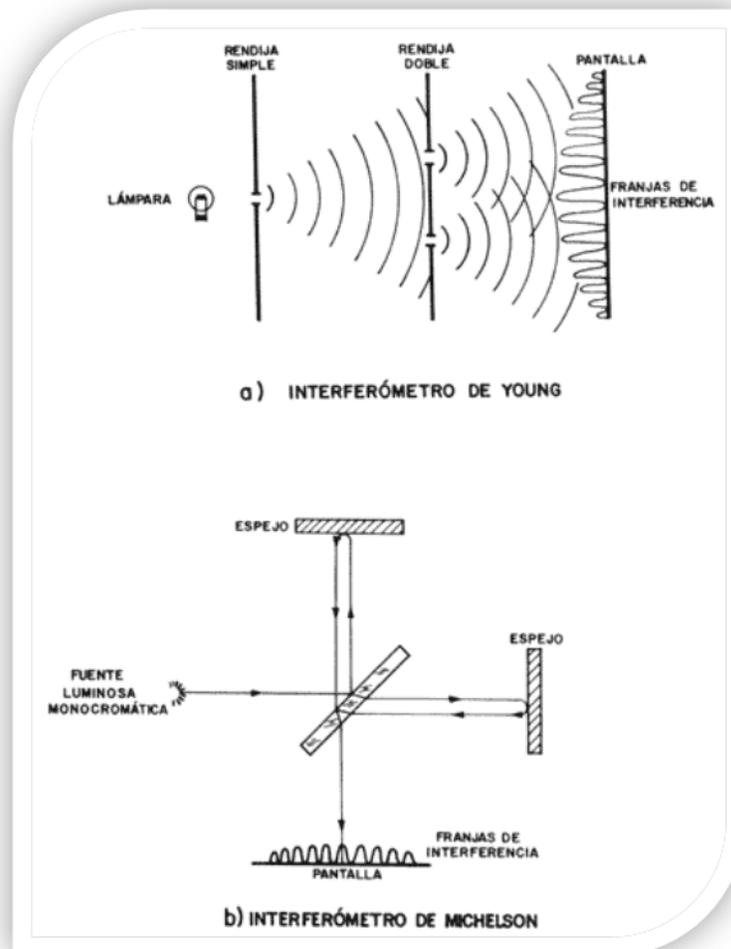


Figura 3.- (a) Interferómetro de Young, que funciona por división de frente de onda y (b) interferómetro de Michelson, que funciona por división de amplitud.

1.2 OBJETIVOS

Caracterizar mecánicamente nuevos materiales nano-estructurados y sistemas ópticos integrados (on-chip) mediante técnicas microscópicas interferométricas basadas en interferómetros de Michelson y Mirau.

En primera instancia se armará y calibrará el sistema. Se obtendrán los aspectos geométricos tridimensionales de las muestras on-chip y serán investigadas.

Las herramientas importantes para llegar al objetivo son el procesamiento digital de franjas. Por esta razón se investigará y aplicará la implementación de algoritmos de detección de fase y desenvolvimiento para obtener topografía de las muestras y posteriormente campos de desplazamiento local que sufre la muestra al ser excitada.

1.3 JUSTIFICACION

Con la realización de este proyecto de investigación se estudiara y asimilara el conocimiento básico de las afecciones introducidas del comportamiento mecánico de los materiales a nivel microscópico.

Se investigaran las metodologías de excitación mecánicas apropiadas a nivel microscópico mediante la construcción de arreglos experimentales (prototipos de laboratorio). Se probará calibrar el sistema mediante la medición de alguna muestra a lo largo de esta y se verificara su confiabilidad comparando resultados con otros métodos.

CAPITULO II

“ASPECTOS GENERALES DE LA EMPRESA”

2.1 ANTECEDENTES

Acorde con el objetivo que el CONACYT estableció desde sus inicios, de fomentar una cultura competitiva basada en el desarrollo científico y tecnológico, enmarcando sus acciones en las políticas y objetivos del Plan Indicativo de Ciencia y Tecnología 1976-1982, el Consejo tuteló la fundación del Centro de Investigaciones en Óptica, Asociación Civil, (CIO), en la ciudad de León Gto. Dicho proceso de creación tuvo su inicio legal el 18 de Abril de 1980, en un acto protocolario en el que se levantó el acta constitutiva de la nueva institución, donde aparecen como firmantes quienes en la época eran autoridad en niveles de gobierno y dependencias oficiales: el Dr. Edmundo Flores, Director General del CONACYT, el Dr. Guillermo Soberón Acevedo, Rector de la UNAM, el Lic. Enrique Velasco Ibarra, Gobernador Constitucional del Estado de Guanajuato y el Lic. Harold Gabriel Appetl, Presidente del Ayuntamiento Constitucional de la Ciudad de León Guanajuato.

La firma del acta constitutiva fue el corolario de múltiples afanes, retos, trabajo y logros previos que fueron encabezados por Dr. Daniel Malacara Hernández, primer científico mexicano en obtener un Doctorado en Óptica en la Universidad de Rochester en 1965, y actual Investigador Emérito del S.N.I., quien es referencia obligada en el desarrollo de la Óptica en todo el mundo. Es esa época y desde diversos encargos y puestos científicos y académicos tanto en la UNAM (en la Facultad de Ciencias primero y más adelante en el Instituto de Astronomía) y después en el INAOE (en donde colaboró en el proyecto para fundarlo a partir del antiguo Observatorio Astrofísico de Tonantzintla), trabajó convencido de la necesidad impostergable de crear en México una institución científica del más alto nivel dedicada en exclusiva al desarrollo de la Óptica, rama del conocimiento que tal como fue previsto por él mismo, es actualmente pieza fundamental y base estratégica de importantes y valiosos desarrollos en ciencia y tecnología. En el esfuerzo por llevar a la realidad lo que entonces era una idea visionaria participaron desde múltiples frentes, personalidades que son ampliamente reconocidos por su trabajo académico, como el Dr. Arcadio Poveda Ricalde, quien impulsó primero la vocación científica del entonces joven estudiante Malacara, como su profesor en varios cursos en la UNAM y lo incorporó después al Instituto de Astronomía, siendo además su tutor de tesis de la licenciatura en física y alentando y apoyando sus posteriores pasos en el INAOE y en la fundación del CIO. Igualmente recibió apoyo en muchas etapas de su desarrollo profesional de parte del Dr. Guillermo Haro Barraza quien en su momento lo incluyó en el ya mencionado proyecto de transformación del Observatorio Astrofísico en Instituto Nacional y más adelante lo alentó en la constitución del CIO. Similar importancia tuvieron además los titulares de los niveles de gobierno estatal y municipal que

ocupaban los cargos en el periodo previo al de quienes firmaron el acta constitutiva, pues fueron los primeros los que acogieron la idea, alentaron el impulso y otorgaron las facilidades necesarias, nunca sencillas ni desdeñables, para que la fundación del CIO llegara a buen término en el estado de Guanajuato y en la ciudad de León más concretamente, en un escenario que tuvo como ingredientes adicionales la oferta y competencia de otros estados de la república para recibir al CIO, en el marco de descentralización impulsada fuertemente en ese momento por el gobierno federal. Esas personas que con sus decisiones y apoyo concretaron el destino del Centro fueron el Lic. Luis H. Ducoing Gamba como titular del gobierno del estado y el C. Roberto Plascencia Saldaña como máxima autoridad del Consejo Municipal que regía a la ciudad de León en la época en que el CIO se gestaba.

Así, en abril de 1980 el CIO se funda en León e inicia labores en un piso rentado de un edificio del primer cuadro de la ciudad con un 1 investigador y 3 técnicos (el propio Dr. Malacara, el entonces M.C. Arquímedes Morales Romero y los Ingenieros José Castro Villicaña y Carlos Javier Martínez Castro, comisionados todos por la UNAM), desarrollando investigación en el área de la instrumentación óptica, fundamentalmente en el área de telescopios astronómicos y superficies ópticas. Se dieron también los primeros pasos para hacer crecer el número de su personal y las áreas de trabajo (que era una de las más urgentes necesidades para crecer y consolidarse, pues había sido ésta también una de las condiciones impuestas por el Consejo y la Universidad Nacional para apoyar el traslado del proyecto a Guanajuato) y lo que es más importante, se inició la divulgación de temas científicos y de la óptica en las instituciones educativas de nivel medio y superior que existían en esa época,

impartiendo cursos en diferentes carreras y dirigiendo tesis con temáticas científicas, tanto en instituciones de la ciudad como en la región central del país.

Es por lo anterior que en el mismo año que el CONACYT celebra su aniversario 35, el CIO festeja a su vez los 25 años de su fundación, periodo en el que ha llegado a consolidarse como una de las instituciones más importantes en su área en todo el mundo. Conviene además señalar que en el ámbito nacional se ha operado siempre dentro del marco de las políticas que para el fomento de la ciencia y la tecnología se han establecido en el gobierno federal e implementadas por el propio Consejo, colocándose siempre a la vanguardia en la aplicación de las políticas mismas y de su traducción a resultados concretos, lo que refleja la capacidad del CIO para responder a las necesidades del entorno nacional e internacional. De esta forma es posible hacer un muy breve resumen de su historia señalando que cuatro investigadores han tenido a su cargo la dirección general del Centro, encabezando cada uno de ellos diferentes etapas en la vida del CIO, que pueden esquematizarse de esta manera:

2.1.1.- CONSOLIDACIÓN

En el mes de septiembre de 1980 en la primera reunión de Órgano de Gobierno del CIO se entrega el nombramiento del Director General al mismo Dr. Daniel Malacara Hernández, cargo que desempeña hasta a 1989. A él correspondió la tarea de consolidar uno de los primeros y más exitosos proyectos para crear instituciones científicas fuera del Distrito Federal, lo que hasta entonces

había sido la tónica del desarrollo científico en el país. Fue durante su gestión cuando se pusieron las bases para un desarrollo sustentado en el trabajo científico de calidad. En un primer momento se enfocaron los esfuerzos para incorporar investigadores jóvenes provenientes de universidades nacionales y se crearon las condiciones para que los mismos salieran a realizar doctorado en instituciones del extranjero, para reintegrarse después y fortalecer la planta científica. En 1983 el CIO se traslada al primer edificio de sus instalaciones definitivas en un terreno donado por el municipio y con un edificio inicial construido por el gobierno del estado. En esta época se crearon también los primeros programas académicos propios: la maestría en ciencias en óptica (1984) y el doctorado en ciencias en óptica (1987), apoyadas por la Universidad de Guanajuato, que expidió los títulos profesionales de quienes ingresaron a estudiar entre 1984 y 1999. Resulta interesante notar que desde su fundación y como resultado de su trabajo científico y tecnológico, al CIO se le empezó a reconocer primero en el extranjero, después en el país y finalmente en la propia ciudad y su región de influencia, donde hasta épocas más recientes se ha incrementado el trabajo para hacer difusión de logros y resultados. Esa parte de la historia del CIO se enmarcó en el Plan Indicativo de Ciencia y Tecnología 1976-1982 establecido por el gobierno federal e instrumentado por el CONACYT, plan que hacía énfasis en la búsqueda del desarrollo científico, la autonomía cultural y la autodeterminación tecnológica señalando como líneas prioritarias la consolidación de las acciones de investigación, la creación de infraestructura y la formación de recursos humanos. En su momento, el Plan Nacional de Desarrollo Tecnológico y Científico 1984-1988 estableció además de los objetivos previos, los primeros pasos para fomentar la vinculación con el entorno productivo nacional.

De 1989 a 1997 el hoy Dr. Arquímedes Morales Romero ejerce la dirección general y diversifica las áreas y grupos de investigación, promueve la incorporación significativa de investigadores extranjeros y da los primeros pasos para conformar equipos que trabajen en el desarrollo de tecnología aplicada, proyecto que tuvo como primer paso la consolidación de grupos fuertes de investigación tanto en la Dirección de Investigación misma como en la entonces Dirección de Desarrollo Tecnológico y Óptica Aplicada. En el plano académico, consolida la calidad de la maestría y el doctorado del CIO y logra su inscripción en el actualmente denominado "Padrón Nacional de Posgrado" del CONACYT. Desarrolla los primeros pasos de colaboración con otros centros CONACYT por una parte, y con el Instituto de Física de la Universidad de Guanajuato por otra, a fin de crear los programas académicos del Posgrado Interinstitucional en Ciencia y Tecnología (PICYT) que actualmente imparte maestría y doctorado en 7 centros del CONACYT en Centros de los estados de Guanajuato, Querétaro, Jalisco y Coahuila, así como el programa de Licenciatura en Física e Ingeniería Física que tiene su sede en el IFUG de la ciudad de León. Bajo la dirección del Dr. Morales el Centro participó en los trabajos de diseño y planeación curricular de ambos programas, que empezaron a impartirse formalmente a partir de 1998. Debe además señalarse como punto relevante de esta gestión el buen éxito del proyecto que, tendiente a fortalecer la presencia regional del Centro, en 1996 tuvo como resultado la creación de la Unidad del CIO en la ciudad de Aguascalientes, acción que sentó las bases para que internamente se definieran de nueva cuenta las áreas de responsabilidad y se reagruparan en la Dirección de Investigación todos los grupos afines y se reorganizara la Dirección de Vinculación y Desarrollo Tecnológico. Todos estas

acciones, su justificación, puesta en marcha, objetivos, logros y evaluación se realizaron a la luz de las directrices emanadas primero de los instrumentos rectores ya mencionados así como de los sucesivos Planes Nacionales de Desarrollo que guiaron el trabajo científico y tecnológico y su inserción con el sector productivo en el periodo de 1988 al año 2000.

De 1997 a 2002 el Dr. Luis Efraín Regalado dirige al CIO y consolida la planta científica a través de la incorporación de investigadores nacionales e internacionales. Dentro de estas acciones de creación y fortalecimiento de grupos y equipos de trabajo, fomentó la política de organización departamental en el área de investigación y la de incorporar investigadores egresados de la propia institución después de haber cumplido de manera relevante con estancias posdoctorales en el extranjero. Acorde con las políticas nacionales que en esa época empezaron a tomar vigor, alentó la orientación de los proyectos de investigación en el marco de las convocatorias para atender necesidades de desarrollo nacionales y regionales Implementó sistemas de gestión y dirección institucional basados en modelos de calidad y puso en marcha sistemas de certificación de calidad de las tareas y objetivos de las diferentes áreas del CIO, entre otras a los talleres y laboratorios del área de aplicaciones tecnológicas, como en los laboratorios de metrología dimensional y el de colorimetría, y en áreas de servicio especializado como la biblioteca de la institución. En el plano académico estableció las condiciones para que los egresados del CIO recibieran sus grados académicos ya no de la Universidad de Guanajuato, con la que por otra parte se mantiene una sólida y estrecha colaboración, sino del propio Centro en una primera etapa a través de la SEP y más adelante del propio CIO en su carácter de Centro Público de Investigación.

En este periodo y su traslape al momento actual, privan las directrices emanadas del nuevo enfoque normativo aplicable a ciencia y tecnología, derivadas de la Ley de Fomento a la Investigación Científica y Tecnológica (1999), el Programa Especial de Ciencia y Tecnología y la Ley de Ciencia y Tecnología del año 2002 y a su traducción en cambios en la concepción, objetivos, metas y estructura operativa del CONACYT.

Es en este marco que en noviembre de 2002 el Dr. Fernando Mendoza Santoyo asume el reto de incrementar la productividad del CIO y llevarla hasta niveles internacionales de calidad en todas sus áreas, pues este reconocimiento mundial ya se tiene para su labor científica de vanguardia, sustentada por una parte en la cantidad de productos de investigación que se generan (artículos, publicaciones, congresos, etc.) así como en la calidad de los mismos (impacto y reconocimiento internacional, entre otros elementos).

En el ámbito del trabajo científico dirige a éste para que en el marco del Programa Especial de Ciencia y Tecnología se impulsen las áreas estratégicas del conocimiento, se atiendan las necesidades que en materia de desarrollo científico, académico, tecnológico y social presenta el país, la región y el estado, sin desatender sino incentivando, la vocación del Centro para cultivar la ciencia básica.

Dentro de las acciones de colaboración internacional ha iniciado un proyecto con la Universidad de Arizona para crear un centro binacional de óptica.

En el plano académico ha establecido el compromiso para obtener el nivel de Competencia Internacional, la más alta categoría del "Padrón de Posgrados" del CONACYT, considerando como parte medular de esta estrategia el fortalecer los mecanismos de promoción y captación de alumnos, la modificación curricular de los programas propios, con el objetivo de satisfacer en tiempo y forma los criterios de productividad y eficiencia terminal propia de los programas de alta calidad, así como hacer acopio de información operativa del desempeño laboral en ámbitos científicos y académicos de sus egresados, a través de programas y acciones para el seguimiento formal de los mismos. En el área del desarrollo tecnológico ha implementado acciones que tendrán por resultado el acercamiento al sector productivo y social para la aplicación de la óptica en la solución de problemas de relevancia regional y nacional. Es oportuno mencionar que las actividades sustantivas del Centro generan resultados que se miden contra indicadores y metas previamente establecidos, mismos que son revisados en su momento por los diferentes órganos de evaluación internos y externos, fundamentalmente el Organismo de Gobierno en el marco del Convenio de Desempeño CIO-CONACYT. En estos procesos de evaluación el Centro ha obtenido permanentemente resultados altamente positivos, siendo notorio que durante la actual administración se han incrementado sustantivamente la cantidad y la calidad de los logros alcanzados y con ellos la calificación que ha merecido el trabajo de la institución y de sus integrantes. **(4)**

2.1.2.-LOGROS

Actualmente el Centro de Investigaciones en Óptica A.C. se define como Centro Público de Investigación, con la misión de llevar a cabo investigación básica y aplicada en Óptica, la formación de recursos humanos de alto nivel en el este mismo campo del conocimiento, así como al fomento de la cultura científica en la sociedad, con la misión además de ser un Centro de Investigación de excelencia, con liderazgo nacional y reconocimiento internacional creciente en el campo de la óptica, ocupando un lugar central en el desarrollo de la ciencia y la tecnología en nuestro país. **(4)**

2.2 UBICACIÓN



Figura 2.2.1. - Logotipo CIO

Loma del bosque 115
 Colonia "Lomas del Campestre"
 C.P.: 37150
 Tel: (01) 447 441 42 00
 Fax: (01) 447 441 42 09
 León, Guanajuato
 México.

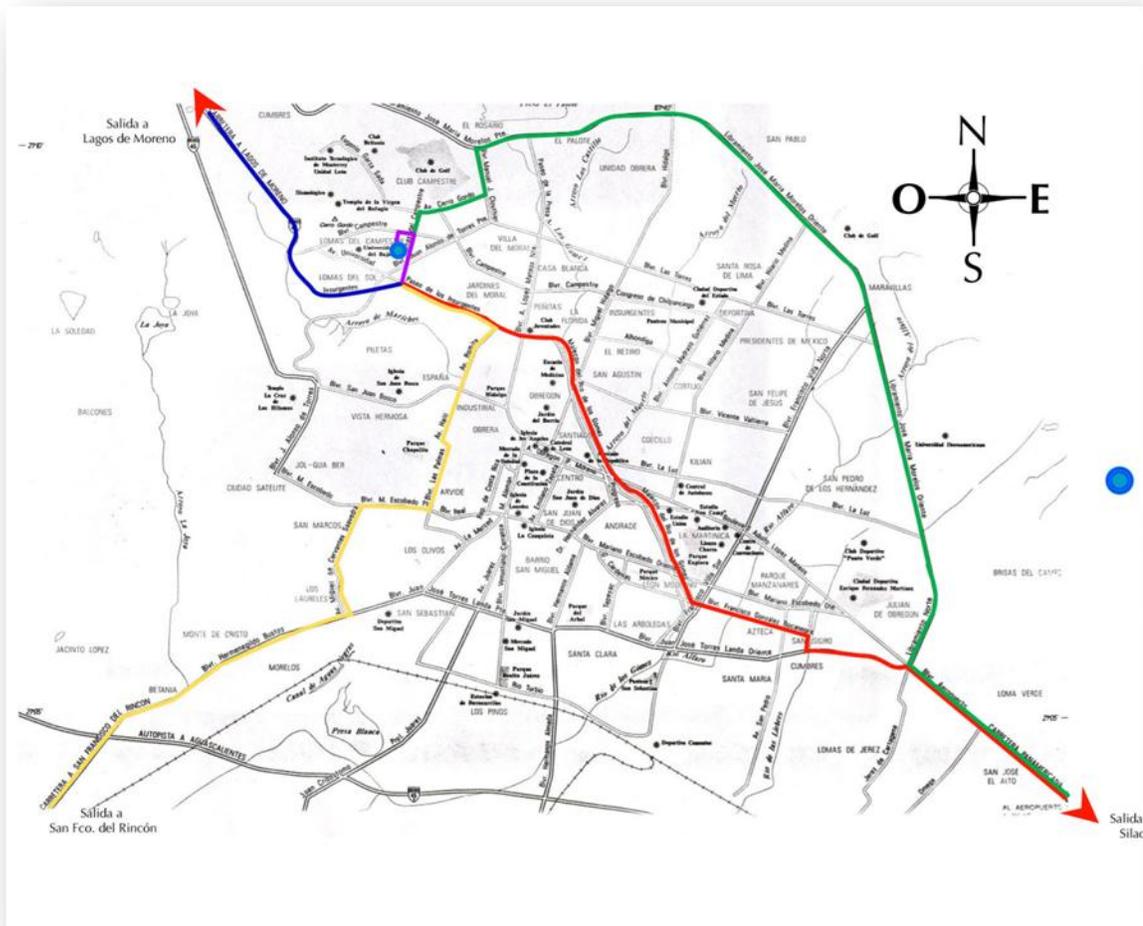


Figura 2.2.2.- Mapa de Localización del CIO

2.3 MISION Y VISION

MISIÓN:

El Centro de Investigaciones en Óptica, A.C., es un centro público de investigación dedicado a la investigación básica y aplicada, la formación de recursos humanos de alto nivel en el campo de la óptica, así como al fomento de la cultura científica en la sociedad.

VISIÓN:

Ser un centro de investigación de excelencia, con liderazgo nacional y reconocimiento internacional creciente en el campo de la óptica, ocupando un lugar central en el desarrollo de la ciencia y la tecnología de nuestro país. **(4)**

2.4 OBJETIVOS ESTRATÉGICO

Son la primera instancia institucional que orienta y da sentido a todas y cada una de las actividades sustantivas y de apoyo en el Centro, así como, a las tareas cotidianas que desarrollan todos y cada uno de sus colaboradores.

En este sentido los objetivos estratégicos del CIO son:

- 1.- Contribuir al conocimiento científico internacional, a través de la investigación teórica y experimental en óptica y disciplinas afines.
- 2.- Fortalecer la capacidad científica y tecnológica humana del país con nivel internacional, a través de programas de estudio de especialización y postgrado.
- 3.- Contribuir al crecimiento tecnológico del país, a través del desarrollo y/o la transferencia de tecnología.
- 4.- Contribuir al desarrollo de una cultura científica en la sociedad mexicana, a través de la divulgación y difusión del conocimiento científico universal.

2.5 ESTRATEGIAS CLAVE

Para lograr sus objetivos, el personal del CIO deberá:

- 1.- Promover acciones para recibir fondos de diversas fuentes para financiamiento de sus actividades.
- 2.- Mantener un alto nivel académico, que se refleje en el éxito y el reconocimiento de nuestra institución. La capacitación y la motivación serán siempre perseguidas y la administración será transparente, eficaz y servicial laborando con los lineamientos claros de sus autoridades. La equidad, el respeto a las personas y a su trabajo, la capacidad creativa y la libertad con responsabilidad, son valores que se reconocerán y se promoverán continuamente.
- 3.- Mantener una infraestructura funcional, moderna y apropiada para lograr la calidad.

2.6. - CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA EN QUE PARTICIPÓ

El área en la cual realice las actividades correspondientes al trabajo de investigación presentadas como proyecto de residencia es el departamento de "Metrología Óptica".

El objetivo del Departamento de "Metrología Óptica" es 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. Esto último incluye el cálculo de forma, textura, color, dimensiones, etc., de objetos. 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 la investigación del departamento de Metrología Óptica son: Pruebas No Destructivas, Inspección de Procesos, Control y Automatización, Perfilometría, Reconocimiento de Patrones, Análisis de Deformación, Análisis Aerodinámico, Detección de Fractura, Calibración, Visión por Computadora, Análisis de Vibraciones, etc.

Específicamente en el Área que estuve involucrado es en el área de "Pruebas Ópticas no Destructivas" en un laboratorio llamado "Metrología II", el cuenta con una

infraestructura moderna con suficiente espacio para construir los prototipos de microscopios interferométricos.

En esta área se lleva a cabo la detección de 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 ilustración se agregan fotos de dicho laboratorio "Metrología II" como **Anexo 1**.

CAPITULO III

“FUNDAMENTO TEORICO”

3.1. - HISTORIA DE LA ÓPTICA

Robert Hooke (1635 - 1703) propuso la idea que la luz era un movimiento vibratorio rápido del medio propagándose a una gran velocidad. Además, «cada pulso o vibración del cuerpo luminoso generará una esfera», -éste fue el comienzo de la teoría ondulatoria-.

Isaac Newton (1642 - 1727) en su estudio con un prisma triangular de vidrio, concluyo que la luz blanca estaba compuesta de una mezcla de una gama completa de colores independientes. Sostuvo que los corpúsculos de la luz asociados con los varios colores, excitaban el éter en vibraciones características. Newton se inclino cada vez más hacia la teoría corpuscular a medida que envejecía.

La teoría ondulatoria de la luz renació de las manos del doctor Thomas Young (1773 - 1829). En 1801, 1802 y 1803 leyó unos artículos ante la Royal Society exaltando

la teoría ondulatoria y añadiendo a ella un nuevo concepto fundamental, el llamado *principio de interferencia*.

<<Cuando dos ondulaciones de diferente orígenes coinciden perfectamente en dirección o casi coincidentes, su efecto conjunto es una combinación de los movimientos que pertenecen a cada uno>>

Young pudo explicar las franjas coloreadas de las películas delgadas y determinó las longitudes de onda de varios colores usando datos de Newton.

Austin Jean Fresnel (1778 - 1827) sintetizó los conceptos de la teoría ondulatoria y el principio de interferencia.

<<Las vibraciones de una onda luminosa en cualquiera de sus puntos se pueden considerar como la suma de los movimientos elementales que le llegan en el mismo instante, por la acción separada de todas las porciones de la onda no obstruida, considerada en cualquiera de sus posiciones anteriores>>

Mientras ocurría todo esto en la óptica, el estudio de la electricidad y el magnetismo estaba también dando frutos de manera independiente. En 1845, Michael Faraday (1791 - 1867) estableció una correlación entre electromagnetismo y la luz cuando encontró que la dirección de polarización de un haz puede alterarse con un campo magnético fuerte aplicado al medio. James Clerk Maxwell (1831 - 1879) resumió brillantemente e incluso amplió todo el conocimiento empírico que se conocía sobre el tema hasta entonces mediante un simple conjunto de ecuaciones matemáticas. La conclusión era inevitable: <<la luz era una

perturbación electromagnética en forma de ondas» propagadas a través del éter.

El norteamericano Albert Abraham Michelson (1852 - 1931) comenzó un experimento para medir el efecto del movimiento de la tierra a través del éter, el resultado fue que no había movimiento detectable de la tierra con respecto al éter. Más tarde se unió al profesor Edwar Willias Morley (1838 - 1923) para volver a hacer el experimento con precisión considerablemente mayor, sin embargo sus resultados fueron de nuevo negativos.

<<De todo lo que precede parece razonablemente cierto que si hay un movimiento relativo entre la tierra y el éter luminífero, éste debe ser pequeño; lo suficientemente pequeño para rebatir la explicación de Fresnel de la aberración>>

En 1905, Albert Einstein (1879 - 1955) presentó su teoría especial de la relatividad en la cual él también, de forma bastante independiente, rechazó la hipótesis del éter. Además postulo que:

<<La luz siempre se propaga en el espacio con una velocidad definida c la cual es independiente del estado de movimiento del cuerpo emisor>>

El 19 de octubre de 1900, Max Karl Ernst Ludwig Plank (1858 - 1947) leyó un artículo ante la German Physical Society en el que presento las bases de lo que sería otra gran revolución en el pensamiento científico: "**La mecánica Cuántica**" una teoría que abarca los fenómenos submicroscópicos.

En 1905, basándose en esas ideas, Einstein propuso una nueva forma de teoría corpuscular en la cual afirmaba que la luz consistía en globos o partículas de energía. Cada uno de tales cuantos de energía radiante o fotones.

Al final de la década de los veinte, a través de los esfuerzos de hombres tales como Bohr, Born, Neisenberg, Schrödinger, De Broglie, Pauli, Dirac y varios otros, la mecánica cuántica quedó como una estructura bien establecida.

La mecánica cuántica también estudia la manera en la que la luz es absorbida y emitida por los átomos. La espectroscopia, es decir, la rama de la óptica que se encarga del análisis espectral, se desarrolló a partir de las investigaciones de Newton.

El florecimiento de la óptica aplicada en lo que va de la segunda mitad del siglo XX, representa un renacimiento en sí mismo, en la década de los años cincuenta, varios investigadores comenzaron a mezclar la óptica con las técnicas matemáticas y los puntos de vista de la teoría de las comunicaciones.

El advenimiento de las computadoras digitales de alta velocidad marcó un amplio adelanto en el diseño de sistemas ópticos complejos. Las lentes asféricas lograron un significado práctico renovado y el sistema limitado por la difracción con un campo de visión apreciable, se hizo realidad. El uso de recubrimientos con películas delgadas y múltiples (reflectoras, antirreflectoras, etc.) se hizo muy común. La óptica de fibras llegó a ser una herramienta práctica y se estudiaron las guías de luz de películas delgadas se prestó mucha atención al extremo infrarrojo del espectro (sistemas de

vigilancia, guía de proyectiles, etc.) lo cual a su vez estimuló el desarrollo de materiales IR. Se empezaron a usar ampliamente los plásticos en la óptica (elementos de lentes, réplicas de redes, fibras, lentes esféricas, etc.). Se desarrolló nuevas clases de vidrios cerámicos. El resurgimiento en la construcción de observatorios astronómicos (terrestres y extraterrestres) que abarcan todo el espectro, ya evidente a finales de los sesenta, siguió con empuje en los ochenta y noventa.

Después de la construcción del primer láser en 1960, los haces láser cubrieron en una década todo el rango desde el infrarrojo al ultravioleta.

La orientación militar de gran parte del trabajo de desarrollo de la década de los sesenta, siguió adelante en los setenta, en los ochenta y en los noventa con nueva fuerza. Este interés tecnológico de la óptica va desde el espectro de las «bombas inteligentes» y satélites espía hasta «rayos de la muerte» y aparatos de infrarrojo capaces de ver en la oscuridad. (1)

3.2.- CONCEPTOS BÁSICOS

El trabajo de J. Clerk Maxwell y los desarrollos posteriores desde finales del siglo XX pusieron de manifiesto que la luz tiene, con toda seguridad, naturaleza electromagnética.

Una onda electromagnética es la forma de propagación de la radiación electromagnética a través del espacio, y sus aspectos teóricos están relacionados con la solución en forma de onda que admiten las ecuaciones de Maxwell.

A diferencia de las ondas mecánicas, las ondas electromagnéticas no necesitan de un medio material para propagarse.

Las ondas luminosas son ondas electromagnéticas cuya frecuencia está dentro del rango de la luz visible.

Una carga eléctrica produce un campo eléctrico en el espacio que rodea y se rige por la ley de Coulomb.



Figura 3.2.1.- Representación de una carga y el campo eléctrico.

Ley de Coulomb

$$\vec{E}(r) = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \frac{\hat{r}}{r^2} \longrightarrow \text{Ecuación 3.2.1}$$

Una carga eléctrica en movimiento equivale a una corriente eléctrica = q/t . Una corriente eléctrica produce un campo magnético en el espacio que la rodea, su unidad en el sistema SI es el Tesla, es perpendicular a la dirección de la corriente y está dada por la ley de Biot-Savart:

$$B(r) = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \longrightarrow \text{Ecuación 3.2.2}$$

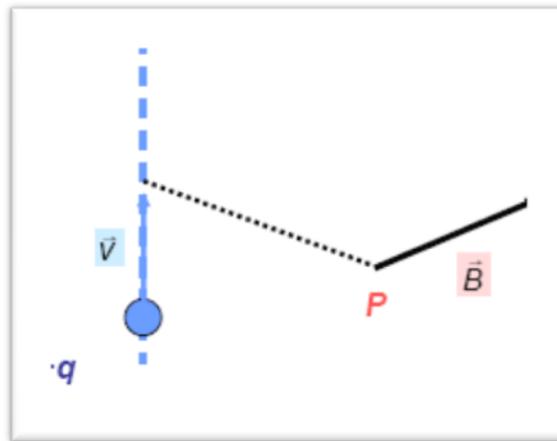


Figura 3.2.2.- Representación de una carga y el campo Magnético.

James Clerk Maxwell fue el primero en hacer la observación teórica de que un campo electromagnético variable admite una solución cuya ecuación de movimiento se corresponde a la de una onda.

Las ecuaciones de Maxwell predicen las ondas electromagnéticas, la forma de estas ecuaciones en el espacio vacío y combinadas es:

$$\nabla^2 E = \varepsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \longrightarrow \text{Ecuación 3.2.3}$$

$$\nabla^2 B = \varepsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 B}{\partial t^2} \longrightarrow \text{Ecuación 3.2.4}$$

Propiedades genéricas de la radiación electromagnética:

- 1) Las ecuaciones de onda se satisfacen simultáneamente para E y B.
- 2) La onda es una onda plana "sin fronteras", es decir, frentes de onda infinitamente grandes.
- 3) Los frentes de onda son planos y-z.
- 4) En estos planos las cantidades deben ser constantes, por tanto las componentes de los campos E y B no son función de "y" o "z".
- 5) Las componentes de E y B a lo largo de la dirección de propagación (x) no varían ni en tiempo ni en espacio.

Adicionalmente las ondas electromagnéticas tienen ciertos planos de polarización. En este caso particular, el plano de polarización de E es el x-y y el de B es el x-z.

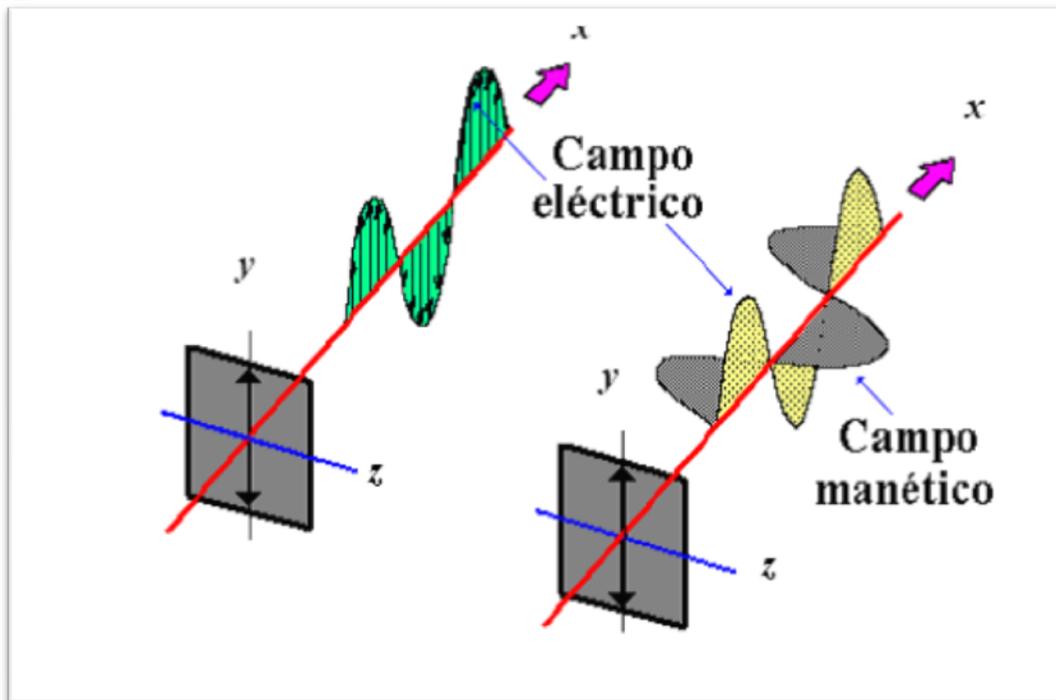


Figura 3.2.3.- Representación de la polarización del campo Eléctrico y el campo Magnético.

Una onda electromagnética unidimensional, plana, polarizada, monocromática, propagándose en la dirección "+ x" se puede representar como:

$$U(x,t) = U_0 \cos \left[2\pi \left(\frac{x}{\lambda} - \frac{t}{T} \right) \right] \longrightarrow \text{Ecuación 3.2.5}$$

O bien:

$$e^{i\theta} = \cos \theta + i \sin \theta \longrightarrow \text{Ecuación 3.2.6}$$

$$U(x, t) = \text{Re} \left\{ U_0 e^{i(kx - \omega t)} \right\} \longrightarrow \text{Ecuación 3.2.7}$$

Esta última es la representación fasorial de una onda.

Para producir una onda electromagnética basta con tener cargas en movimiento acelerado, o corrientes que varían en el tiempo.

3.3.- ONDAS PLANAS

La onda plana es quizás el ejemplo más simple de onda tridimensional. Existe en un instante dado, cuando todas las superficies sobre las cuales una perturbación tiene fase constante, forman un conjunto de planos, cada uno generalmente perpendicular a la dirección de propagación. Hay razones prácticas para estudiar este tipo de perturbación, una de las cuales es que usando sistemas ópticos podemos producir fácilmente luz semejante a ondas planas.

Una **onda plana** es una onda de frecuencia constante cuyos frentes de onda (superficies con fase constante) son planos paralelos de amplitud constante normales al vector de velocidad de fase. Es decir, son aquellas ondas que se propagan en una sola dirección a lo largo del espacio, como por ejemplo las ondas en los muelles o en las cuerdas. Si la onda se propaga en una dirección única, sus frentes de ondas son planos y paralelos.

Por extensión, el término es también utilizado para describir ondas que son aproximadamente planas en una región localizada del espacio. Por ejemplo, una fuente de ondas electromagnéticas como una antena produce un campo que es aproximadamente plano en una región de campo lejano. Es decir que, a una distancia muy alejada de la fuente, las ondas emitidas son aproximadamente planas y pueden considerarse como tal.

Matemáticamente, una onda plana es una solución de la ecuación de onda de la siguiente forma:

$$u(\vec{x}, t) = ae^{i(\vec{k}\cdot\vec{x}-\omega t)} \longrightarrow \text{Ecuación 3.3.1}$$

Dónde i es la unidad imaginaria, k es el vector de onda, ω es la frecuencia angular y a es la amplitud compleja. La solución física es usualmente encontrada tomando la parte real de la expresión.

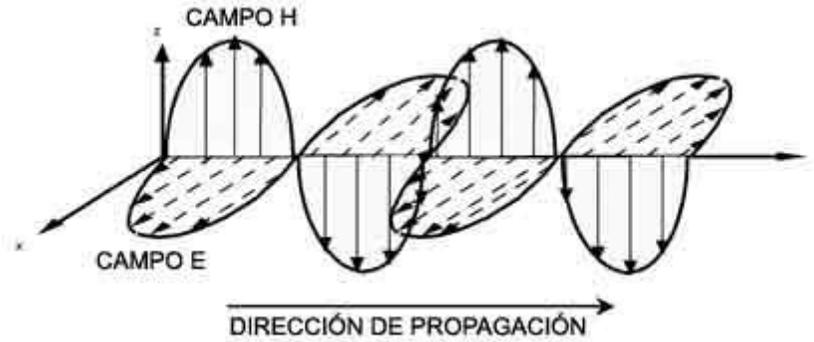


Figura 3.3.1.- Diagrama de una onda plana

Si la onda se propaga en una dirección sus frentes de onda son planas y los rayos son paralelos.

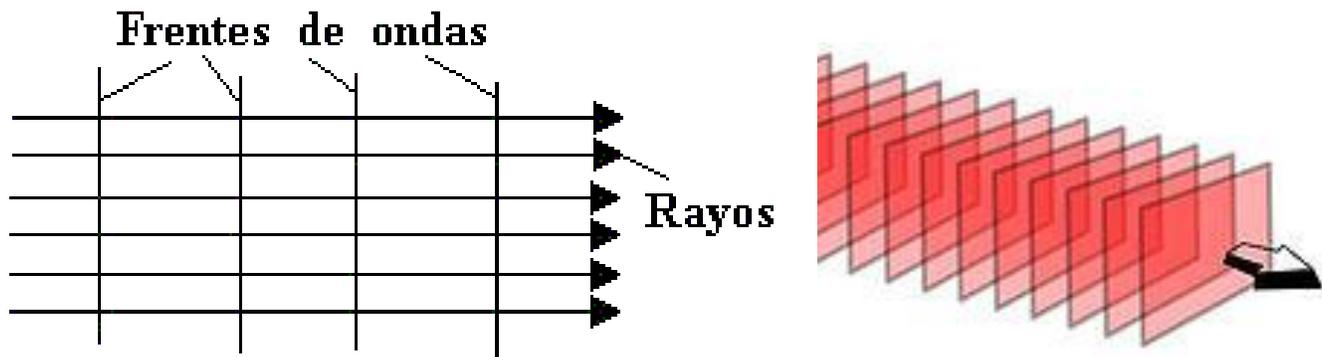


Figura 3.3.2 y Figura 3.3.3.- Frentes de onda plana dirección y forma.

3.4.- IRRADIANCIA

Al hablar de la «cantidad» de luz que ilumina una superficie, se hace referencia a algo que se llama irradiancia, esta designado por **I** -la *energía media por unidad de* *área por*
unidad d $I = \frac{c \epsilon_0}{2} E_0^2$ \longrightarrow **Ecuación 3.4.1** *tiempo.-*

La irradiancia es proporcional al cuadrado de la amplitud del campo eléctrico.

3.5.- INTERFERENCIA

Las intrincadas distribuciones de color que resplandecen sobre la mancha de aceite en el pavimento asfáltico mojado son el resultado de una de las manifestaciones más comunes del fenómeno de interferencia. En una escala macroscópica, podríamos considerar el problema relacionado con la interacción de las ondulaciones de la superficie en un estanque de agua.

Nuestra experiencia diaria con esta clase de situación nos permite visualizar una distribución compleja de perturbaciones. Puede haber regiones en donde dos (o más) ondas se hayan superpuesto, anulándose mutuamente parcialmente o incluso completamente. Otras regiones podrían existir aún en la distribución, donde los valles o las crestas resultantes fueran más pronunciadas que los de cualquiera de las ondas constructivas. Después de superponerse, las ondas individuales se separan y siguen adelante, completamente inalteradas por su encuentro anterior.

La interferencia óptica equivale a la interacción de dos o más ondas de luz que producen un irradiancia resultante que se desvía de la suma de las irradiancias componentes.

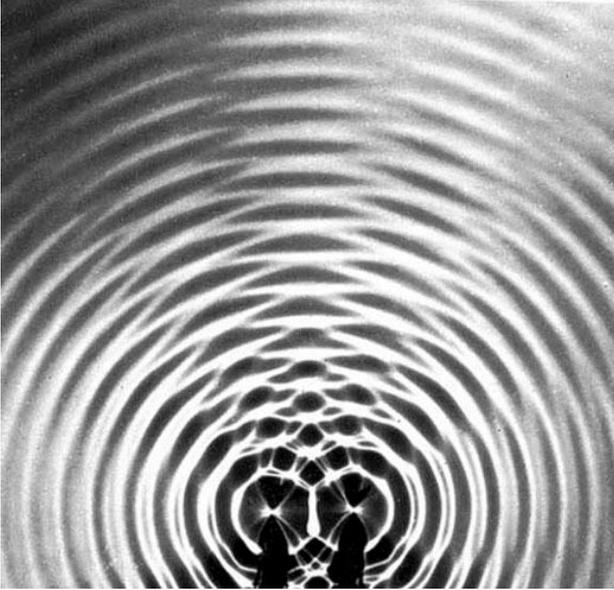


Figura 3.5.1- ondas en agua de dos fuentes puntuales en fase en una cubeta de ondas. En el medio de la distribución., los picos de la onda (franjas brillantes delgadas) y los valles (franjas negras delgadas) de la onda se hallan dentro de áreas alargadas en forma de cuña (máximos) separados por zonas oscuras estrechas de quietud (mínimos).

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.

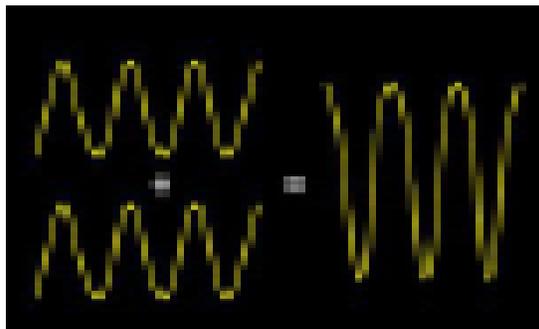
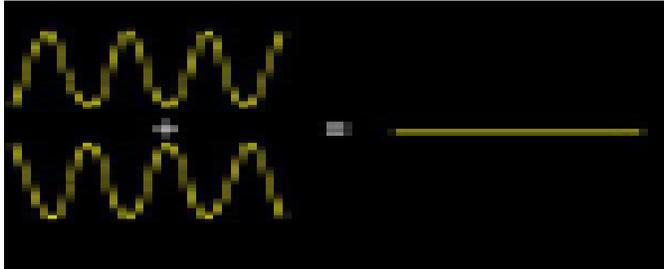


Figura 3.5.2- Superposición de dos ondas que resultan en una interferencia constructiva

INTERFERENCIA DESTRUCTIVA:

Ondas completamente fuera de fase se anulan y la suma es cero.



**Figura 3.5.3- Superposición de dos ondas que
Resulta en una interferencia destructiva**

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

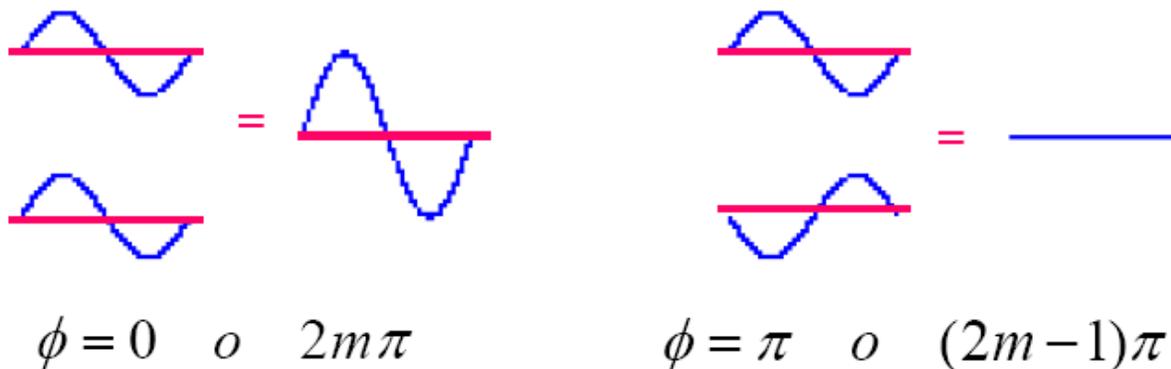


Figura 3.5.4- Superposición de dos ondas Armónicas

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).

Así, podemos tener una superposición gráfica de ellas como se muestra en la siguiente figura:

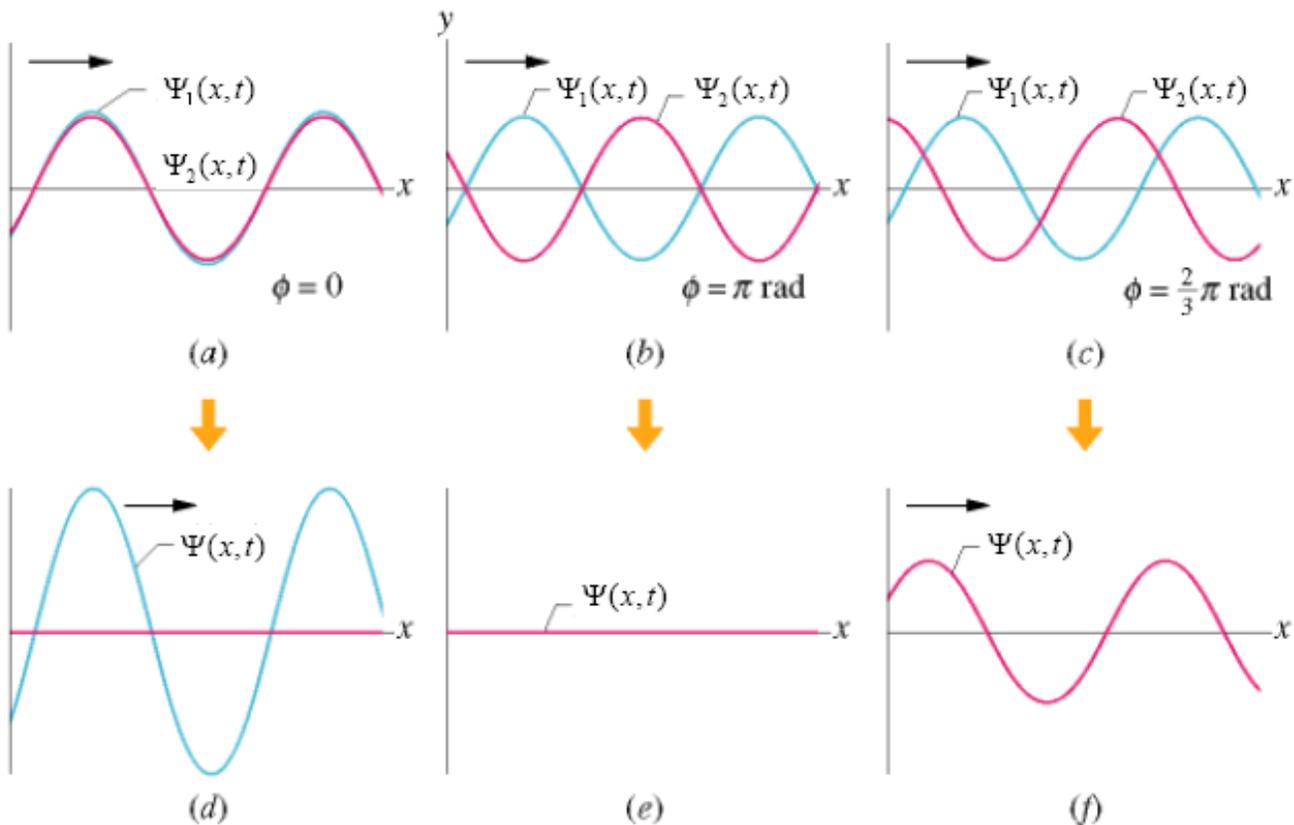


Figura 3.5.5- Superposición ondas Armónicas

Consideremos las dos ondas armónicas de igual frecuencia y amplitud viajando en la misma dirección y en el mismo medio. La única diferencia entre ellas es la fase, ϕ .

$$\Psi_1(x, t) = \Psi_o \cos(kx - \omega t) \quad \Psi_2(x, t) = \Psi_o \cos(kx - \omega t + \phi)$$

$$\begin{aligned} \Psi(x, t) &= \Psi_1(x, t) + \Psi_2(x, t) \\ &= \Psi_o \cos(kx - \omega t) + \Psi_o \cos(kx - \omega t + \phi) \end{aligned}$$

como $\cos a + \cos b = 2 \cos \frac{a+b}{2} \cos \frac{a-b}{2}$

$$\Psi(x, t) = \underbrace{\left[2\Psi_o \cos\left(\frac{\phi}{2}\right) \right]}_{\text{Amplitud}} \underbrace{\cos\left(kx - \omega t + \frac{1}{2}\phi\right)}_{\text{Término oscilante}} \longrightarrow \text{Ecuación 3.5.1}$$

Concentremos nuestra atención sobre la amplitud de la onda resultante. Esta depende críticamente de la diferencia de fase, ϕ

$$\Psi'_o = 2\Psi_o \cos\left(\frac{\phi}{2}\right) \longrightarrow \text{Ecuación 3.5.2}$$

Interferencia Constructiva

$\phi = 0, 2\pi, 4\pi, \dots$ o sea, cualquier múltiplo de 2π

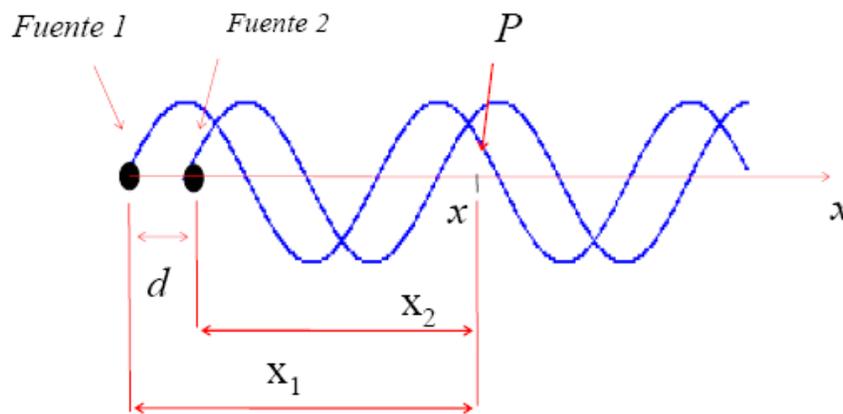
La amplitud resultante, $\Psi'_o = 2\Psi_o$

Interferencia Destructiva

$\phi = \pi, 3\pi, 5\pi, \dots$ cualquier múltiplo impar de π !

La amplitud resultante, $\Psi_o' = 0$

Normalmente, el desfase aparece cuando las ondas recorren caminos distintos, por ejemplo:



$$\Psi_1(x, t) = \Psi_o \text{sen}(kx - \omega t) \quad \Psi_2(x, t) = \Psi_o \text{sen}[k(x - d) - \omega t]$$

Figura 3.5.6. - Desfase de ondas

Note que se anula en $x = 0$ y $t = 0$, se anula en $x = d$ y $t = 0$.

$$\Psi_2(x, t) = \Psi_o \text{sen}(kx - \omega t - kd) = \Psi_o \text{sen}(kx - \omega t + \phi) \rightarrow \text{Ecuación 3.5.3}$$

Comparando $\Psi_1(x, t)$ con $\Psi_2(x, t)$, vemos que se hallan desfasadas un ángulo ϕ (en radianes) igual a:

$$\phi = -kd \quad \longrightarrow \quad \begin{array}{l} \text{Ecuación} \\ 3.5.4 \end{array}$$

$$\phi = -2\pi \frac{d}{\lambda} \quad \longrightarrow \quad \begin{array}{l} \text{Ecuación} \\ 3.5.5 \end{array}$$

El signo menos cambia a signo más si colocamos el sistema de coordenadas en la fuente 2 en lugar de 1 (verifique). En general podemos reescribir:

$$\phi = 2\pi \frac{\Delta x}{\lambda} \quad \longrightarrow \quad \begin{array}{l} \text{Ecuación} \\ 3.5.6 \end{array}$$

$$\Delta x = x_2 - x_1 = -d \quad \longrightarrow \quad \begin{array}{l} \text{Ecuación} \\ 3.5.7 \end{array}$$

Note que Δx no es una distancia sino una diferencia de *camino óptico* ($n = 1$) recorrido.

En el caso extremo en que la diferencia de camino óptico Δx sea exactamente igual a una longitud de onda o un múltiplo entero de ésta, el desfase resulta nulo o múltiplo de 2π , con lo cual las ondas interfieren constructivamente (ver figura 3.5.7), es decir:

$$\text{Si } \Delta x = m\lambda \text{ con } m \in \mathbb{Z} \Rightarrow \phi = m2\pi \equiv 0$$

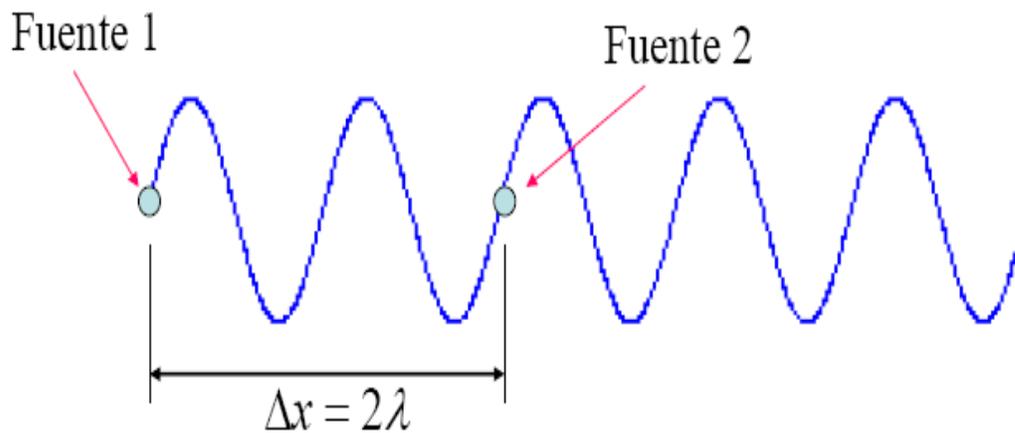


Figura 3.5.7.- Desfase nulo de dos ondas al ser múltiplo entero de π

En el otro caso extremo, en que la diferencia de camino óptico Δx resulta exactamente igual a media longitud de onda o un múltiplo impar de media longitud de onda, el desfase resulta ser π o múltiplo impar de π , con lo cual las ondas interfieren destructivamente (ver figura 3.5.8), es decir:

Si $\Delta x = (2m'+1)\lambda$ con $m' \in Z \Rightarrow \phi = (2m'+1)\pi \equiv \pi$

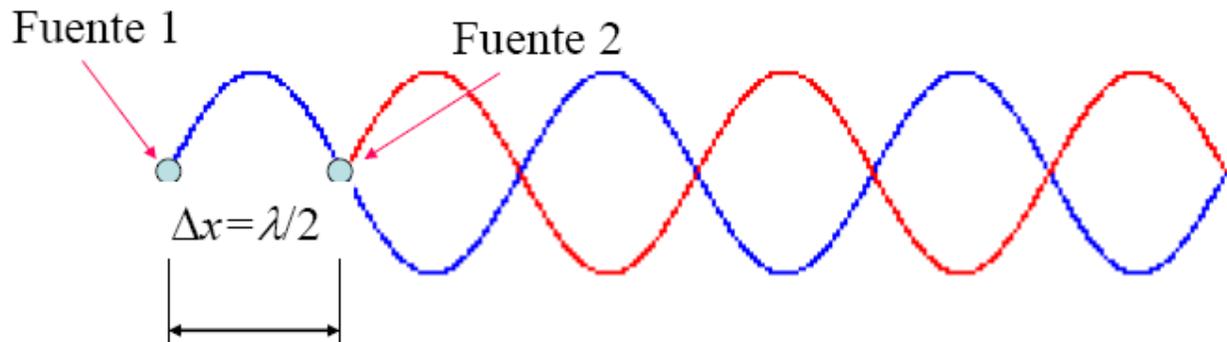


Figura 3.5.8.- Desfasaje Destructivo de dos ondas al ser múltiplo impar de π .

Así, en general:

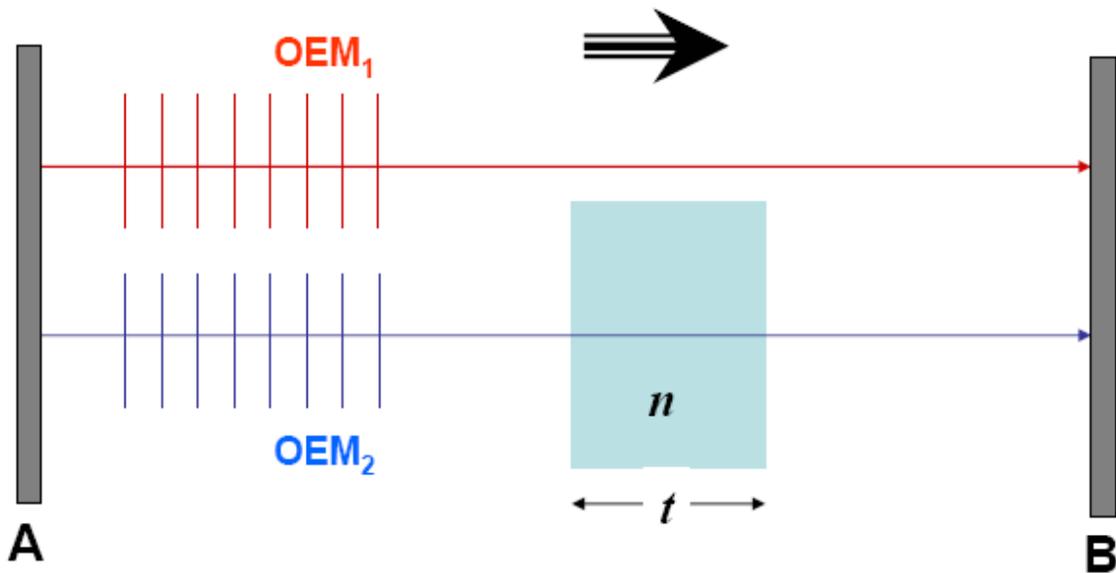
Diferencia de Fase = $k \times$ Diferencia de Camino Óptico

$$DF = k \times DCO$$

$$\Delta\phi = k \cdot DCO$$

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot DCO \rightarrow \text{Ecuación 3.5.8}$$

Diferencia de camino óptico (DCO)



$$DCO = nt - t = (n - 1)t$$

Figura 3.5.9.- Diferencia de camino óptico.

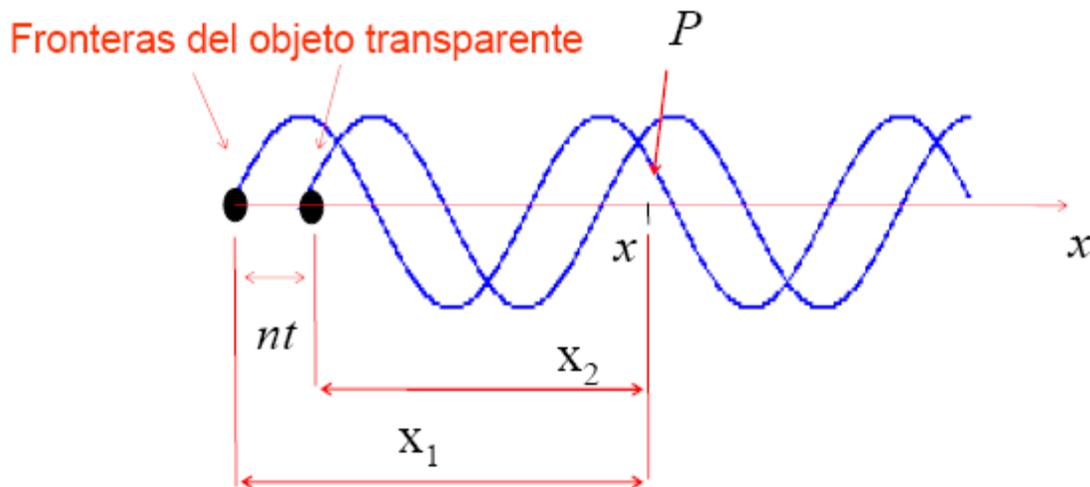


Figura 3.5.10.- Diferencia de camino óptico con fronteras del objeto transparente.

$$U_1(x) = U_o e^{ikx} \quad U_2(x) = U_o e^{ik(x-nt)} \quad \Rightarrow \quad \Delta\phi = knt$$



Ecuación

3.5.8

En general

$$\Delta\phi = k \times DCO \Rightarrow \Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \times DCO + \underbrace{(\varepsilon_2 - \varepsilon_1)}_{\text{Diferencia de fase inicial}}$$



Ecuación

3.5.9

3.6.- CAUSAS ÓPTICAS DE LA INTERFERENCIA DE DOS ONDAS

Dos ondas viajando a pequeñas diferencias de distancia e incidiendo a un mismo punto:

Fuentes



Figura 3.6.1.- Diferencia Ondas separadas por una Distancia Pequeña e incidentes en un punto

Dos aberturas brillantes en una pantalla opaca (División de Frente de Onda):

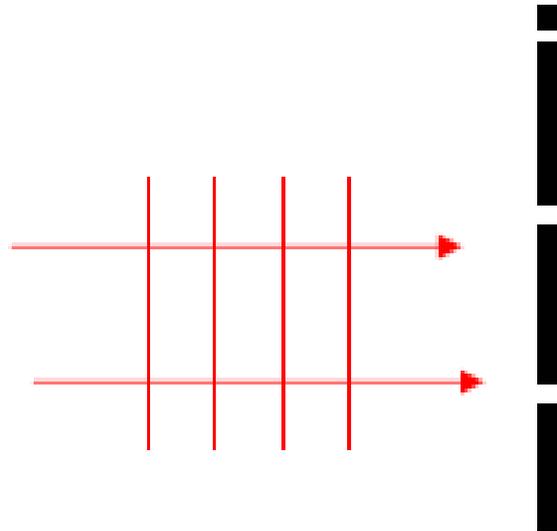


Figura 3.6.2.- División de Frente de Onda.

Luz reflejada en dos superficies (División de Amplitud)

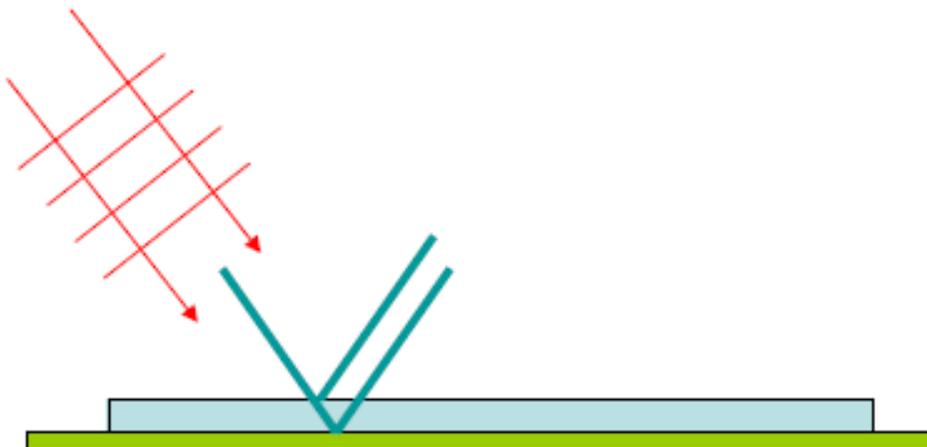


Figura 3.6.3.- División de Amplitud.

En tres dimensiones:

$$U_{3D}(x, y, z, t) = U_o(x, y, z)e^{+i(k_x x + k_y y + k_z z - \omega t)} \longrightarrow \text{Ecuación 3.6.1}$$

En dos dimensiones:

$$U_{2D}(x, y, t) = U_o(x, y)e^{+i(k_x x + k_y y - \omega t)} \longrightarrow \text{Ecuación 3.6.2}$$

En una dimensión:

$$U_{1D}(x, t) = U_o(x, y)e^{+i(k_x x - \omega t)} \longrightarrow \text{Ecuación 3.6.3}$$

En general:

$$U(\vec{r}, t) = U_o(\vec{r})e^{i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)} = U_o(\vec{r})e^{i\phi(\vec{r}, t)} \longrightarrow \text{Ecuación 3.6.4}$$

Plana:

$$U(\vec{r}, t) = U_o(\vec{r})e^{i\phi(\vec{r}, t)} \longrightarrow \text{Ecuación 3.6.5}$$

Esférica:

$$U(\vec{r}, t) = \frac{U_o(\vec{r})}{r} e^{i\phi(\vec{r}, t)} \longrightarrow \text{Ecuación 3.6.6}$$

Cilíndrica:

$$U(\vec{r}, t) = \frac{U_o(\vec{r})}{\sqrt{r}} e^{i\phi(\vec{r}, t)} \longrightarrow \text{Ecuación 3.6.7}$$

3.7.- CONDICIONES PARA LA INTERFERENCIA

Si dos haces deben interferir para producir una distribución estable, su frecuencia tiene que ser casi igual ya que una diferencia de frecuencia significativa resultaría en un desfase de variación rápida y dependiente del tiempo que, a su vez, haría que I_{12} se promediaría a cero durante el intervalo de detección. Sin embargo, si ambas fuentes emiten luz blanca, las componentes rojas interferirán con las rojas y las azules con las azules. Muchas distribuciones monocromáticas superpuestas, bastante similares y ligeramente desplazadas producirán una distribución global de luz blanca que no será tan nítida o extensa como una distribución cuasimocromática, sin embargo, la luz blanca producirá interferencia observable.

Las distribuciones más claras existirán cuando las amplitudes de las ondas parásitas sean iguales o así iguales. Las regiones centrales de las franjas oscuras y claras corresponden entonces a interferencia completamente destructiva o constructiva, respectivamente, que dan como resultado un contraste máximo.

Para poder observar una distribución de franjas, las dos fases no tienen por qué estar en fase con otra. Una figura de interferencia ligeramente desplazada pero, por otro lado, idéntica se dará si entre las fuentes existe un desfase inicial, siempre y cuando permanezca constante. Dichas fuentes (que pueden estar en fase o no pero que marchan siempre juntas) se denominan coherentes.

3.8.- INTERFERÓMETROS

El Interferómetro es un instrumento que emplea la interferencia de ondas de luz para la medida ultra precisa de longitudes de onda de la luz misma, de distancias pequeñas y de determinados fenómenos ópticos.

Existen muchos tipos de interferómetros, pero en todos ellos hay dos haces de luz que recorren dos trayectorias ópticas distintas determinadas por un sistema de espejos y placas que finalmente se unen para formar franjas de interferencia.

Para medir la longitud de onda de una luz monocromática se utiliza un interferómetro dispuesto de tal forma que un espejo situado en la trayectoria de uno de los haces de luz puede desplazarse una distancia pequeña —que puede medirse con precisión— y varía así la trayectoria óptica del haz. Cuando se desplaza el espejo una distancia igual a la mitad de la longitud de onda de la luz, se produce un ciclo completo de cambios en las franjas de interferencia.

La longitud de onda se calcula midiendo el número de ciclos que tienen lugar cuando se mueve el espejo una distancia determinada.

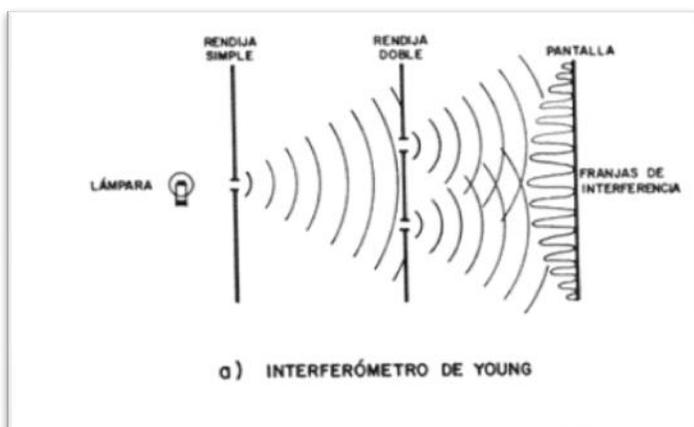


Figura 3.8.1 (a).- Interferómetro de Young, que funciona por división de frente de onda.

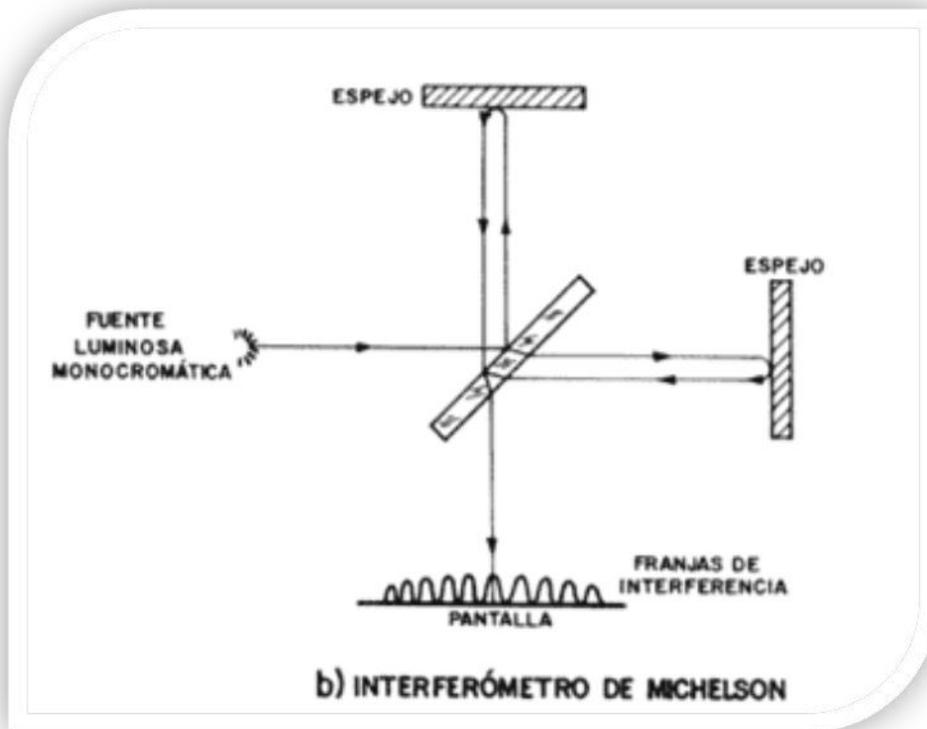


Figura 3.8.1 (b).- Interferómetro de Michelson,
Que funciona por división de amplitud.

3.8.1.- INTERFERÓMETRO TIPO MICHELSON

El interferómetro de Michelson es uno de los instrumentos de interferencia más conocido, tanto por sus múltiples aplicaciones como por su implicancia en el desarrollo de nuestro entendimiento del mundo físico. Usando este dispositivo, Michelson y Morley pusieron en evidencia la inconsistencia de la teoría del éter. Este hecho contribuyó al desarrollo de la teoría de la relatividad. (1.4.5)

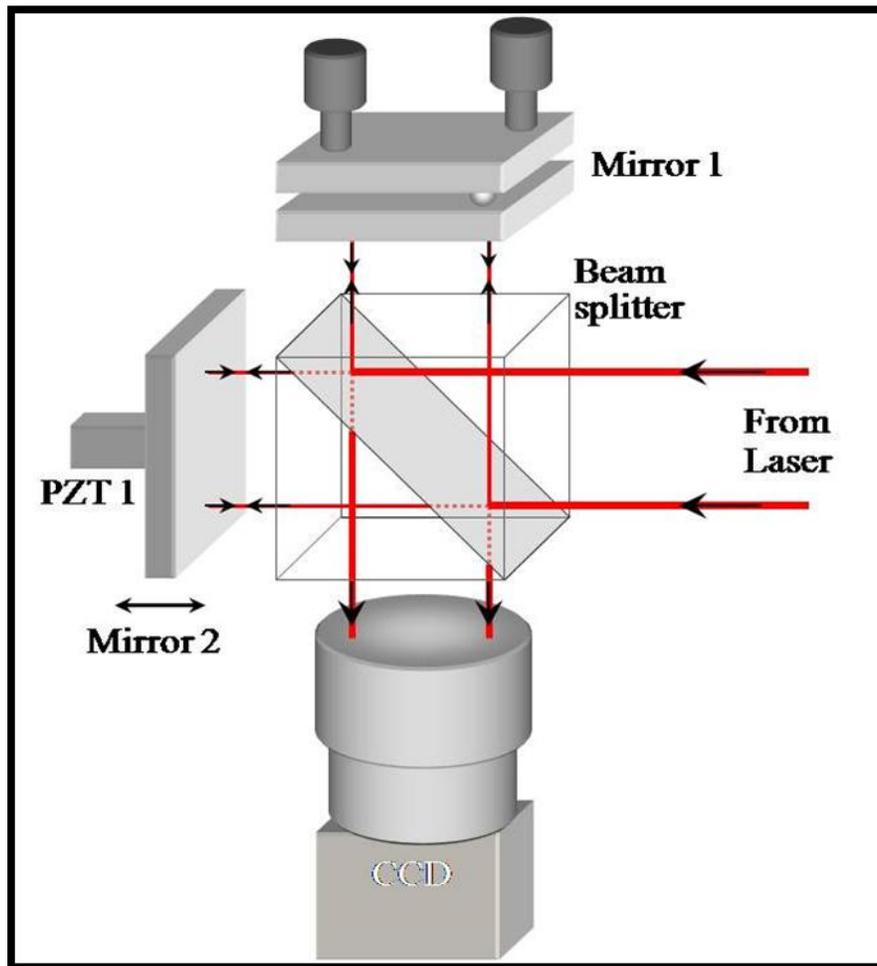


Figura 3.8.1.1.- Diagrama esquemático del interferómetro de Michelson. *Mirror 1* ($M1$) y *Mirror 2* ($M2$) son dos espejos de primeras superficies. M_s es un divisor de haz ("beam splitter") o espejo semitransparente. Los haces se recombinan e inciden y por medio de la cámara CCD se pueden ver las figuras de interferencia.

Este interferómetro se basa en el principio de división de un haz luminoso por un divisor de haz ("beam splitter") o espejo semitransparente, M_s . En M_s el haz incidente es en parte transmitido al espejo $M1$, y en parte reflejado al espejo $M2$. En estos espejos, ambos haces son reflejados. Luego de transmitirse y reflejarse nuevamente en M_s , dichos haces se recombinan en la Cámara CCD.

Dependiendo de la diferencia de caminos que estos haces hayan recorrido, la interferencia será constructiva o destructiva. En rigor, si los espejos $M1$ y $M2$ no son exactamente perpendiculares, caso habitual, cada porción de haz que se refleja en distintas partes de los espejos llegará a la cámara habiendo recorrido longitudes distintas. Esto resultará en que sobre la cámara observemos un conjunto de líneas brillantes y oscuras, cuya orientación dependerá de cómo se realice el ajuste fino de los espejos $M1$ y $M2$. Por lo tanto para obtener buenos resultados con este instrumento es importante disponer de buenos posicionadores de los espejos. Es importante contar con algún modo de regulación de los espejos. Los espejos $M1$ y $M2$ deben ser espejos de primera superficie, es decir con plateado o aluminizado en la cara frontal. Tanto los espejos como los posicionadores se pueden fabricar en forma artesanal o adquirirse de proveedores comerciales. Cuando los espejos $M1$ y $M2$ son perpendiculares, se observan anillos concéntricos brillantes y oscuros. La razón de estos anillos puede entenderse notando que los espejos M_s , $M1$ y $M2$ tienen por efecto producir dos imágenes de las fuentes $S1$ y $S2$ separadas una distancia $2\Delta x$. Aquí Δx es la diferencia de longitud de los brazos del interferómetro delimitado por M_s a $M2$ y M_s a $M1$.

El origen de los anillos está asociado a que la diferencia de los caminos $r1$ y $r2$ varía con la posición del punto P . Sin embargo, esta diferencia de camino es la misma para cualquier circunferencia centrada en el eje óptico del interferómetro (ver figura 3.8.1.2.)

Diagrama esquemático del Interferómetro de Michelson

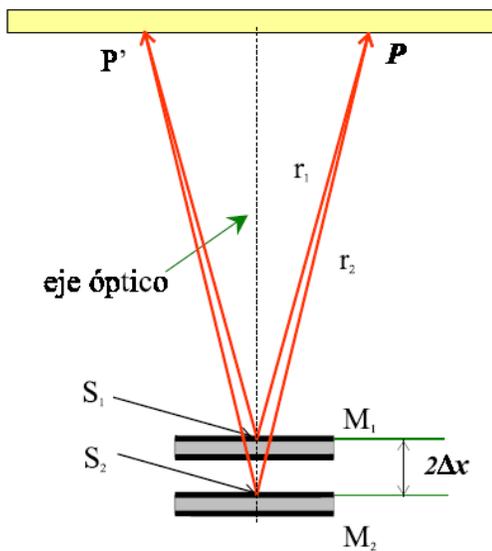


Figura de interferencia con los espejos M_1 y M_2 perpendiculares

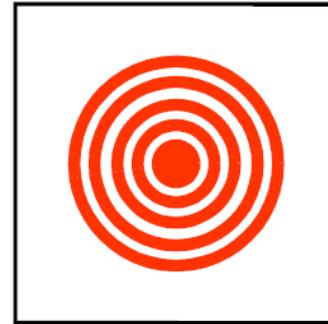


Figura 3.8.1.1.- Diagrama esquemático del interferómetro de Michelson. S_1 y S_2 son la dos imágenes de la fuente formadas por los espejos M_1 y M_2 . A la derecha vemos las figuras de interferencia cuando los espejos están perfectamente perpendiculares.

3.8.2.- USOS DEL INTERFERÓMETRO

Cuando se conoce la longitud de onda de la luz empleada, pueden medirse distancias pequeñas en la trayectoria óptica analizando las interferencias producidas. Esta técnica se emplea para medir el contorno de la superficie de los espejos de los telescopios. Los índices de refracción de una sustancia también pueden medirse con el interferómetro, y se calculan a partir del desplazamiento en las franjas de interferencia causado por el retraso del haz. El principio del interferómetro también se emplea para medir el diámetro de estrellas grandes

relativamente cercanas, como por ejemplo Betelgeuse. Como los interferómetros modernos pueden medir ángulos extremadamente pequeños, se emplean —también en este caso en estrellas gigantes cercanas— para obtener imágenes de variaciones del brillo en la superficie de dichas estrellas.

Hoy en día, por medio de técnicas interferométricas se pueden realizar una gran variedad de medidas sumamente precisas, entre las que podemos mencionar las siguientes:

3.8.2.1.- MEDIDA Y DEFINICIÓN DEL METRO PATRÓN.

El primero que tomó la longitud de onda de la luz como referencia para especificar longitudes de objetos fue Michelson, donde el primer objetivo es medir la separación entre dos espejos, los que forman un sistema llamado etalón. La separación entre los espejos del etalón es un múltiplo entero de medias longitudes de onda de la luz empleada, a fin de que los haces reflejados en ambos espejos del etalón estén en fase.

El proceso es bastante laborioso, pues hay necesidad de usar un gran número de etalones, donde cada uno tiene aproximadamente el doble de longitud que el anterior. La razón de este largo proceso es que no es posible contar las franjas de interferencia que aparecen al ir moviendo uno de los espejos hasta llegar a la distancia de un metro. La limitación es la coherencia del haz luminoso, que se describirá más tarde en la sección de láseres. Actualmente, con el láser, es mucho más simple la medición del metro patrón por Interferometría.

En 1960 el metro fue definido como igual a 1650 763.73 longitudes de onda en el vacío, de la luz emitida en una cierta línea espectral del kriptón-86. Sin embargo, en lugar de definir el metro y luego medir la velocidad c de la luz usando esta definición, es posible hacer lo contrario.

Es decir, se define primero la velocidad c de la luz como una cierta cantidad de metros recorridos en un segundo, de donde podemos escribir:

$$c = d/t$$

El siguiente paso es definir el metro como la distancia recorrida por la luz en un tiempo igual a $1/c$. Esto es lo que actualmente se ha hecho para definir el metro.

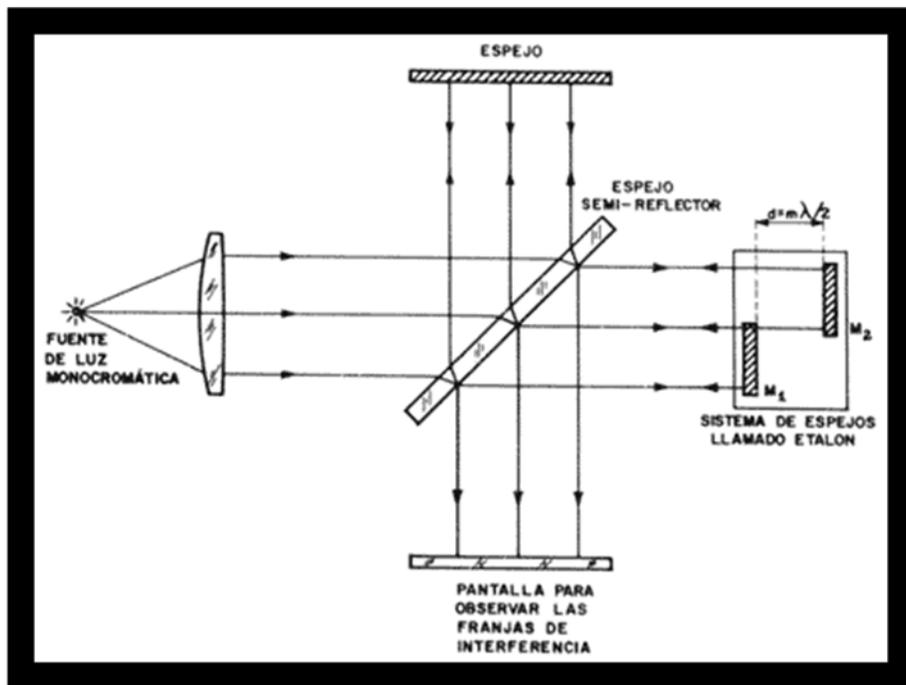


Figura 3.8.2.1.- Interferómetro de Michelson con etalón, para medir longitudes

3.8.2.2.- MEDIDA DE LAS DEFORMACIONES DE UNA SUPERFICIE.

Frecuentemente, debido a causas muy variadas, una superficie puede tener deformaciones pequeñísimas que no son detectables a simple vista. A pesar de su reducida magnitud, estas deformaciones pueden ser el síntoma de problemas graves presentes o futuros. Como ejemplo, podemos mencionar una fractura de un elemento mecánico de un avión o de una máquina. Otro ejemplo es un calentamiento local anormal en un circuito impreso o en una pieza mecánica sujeta a fricción. Finalmente, Otro ejemplo es una deformación producida por esfuerzos mecánicos que ponen en peligro la estabilidad del cuerpo que los sufre.

Es aquí donde la Interferometría tiene un papel muy importante, detectando y midiendo estas pequeñísimas deformaciones de la superficie. Esta aplicación de las técnicas interferométricas es especialmente útil y poderosa si se le combina con técnicas holográficas, en un proceso llamado Interferometría holográfica. La figura 3.8.2.2 muestra un ejemplo de deformación local de la superficie de una cubeta de plástico, medida con Interferometría.

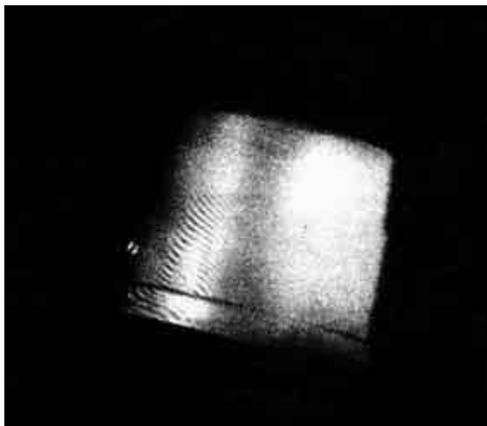


Figura 3.8.2.2.- Detección interferométrica de deformaciones.

3.8.2.3.- DETERMINACIÓN DE LA FORMA EXACTA DE UNA SUPERFICIE.

Las superficies ópticas de los instrumentos modernos de alta precisión tienen que tallarse de tal manera que no tengan desviaciones de la forma ideal, mayores de una fracción de la longitud de onda de la luz. Para hacer el problema todavía más difícil, la superficie muy frecuentemente no es esférica sino de cualquier otra forma, a la que de modo general se le denomina esférica.

Esta superficie esférica puede ser, por ejemplo, un paraboloides o un hiperboloides de revolución, como ocurre en los telescopios astronómicos, donde además la superficie a tallar puede ser de varios metros de diámetro. Es fácil comprender lo difícil que resulta tallar una superficie tan grande. Sin embargo, el problema principal es medir las deformaciones de la superficie respecto a su forma ideal.

Esto se hace mediante la Interferometría, con técnicas muy diversas y complicadas que no es posible describir aquí. Si la superficie de espejo principal o primario de un telescopio fuera perfectamente esférica, las franjas de interferencia serían rectas. Si tienen una pequeña curvatura de las franjas se debe a que la superficie es ligeramente elipsoidal en lugar de esférica, aunque la desviación es apenas alrededor de media longitud de onda, lo que es aproximadamente tres diezmilésimas de milímetro. Ver figura 3.8.2.3.

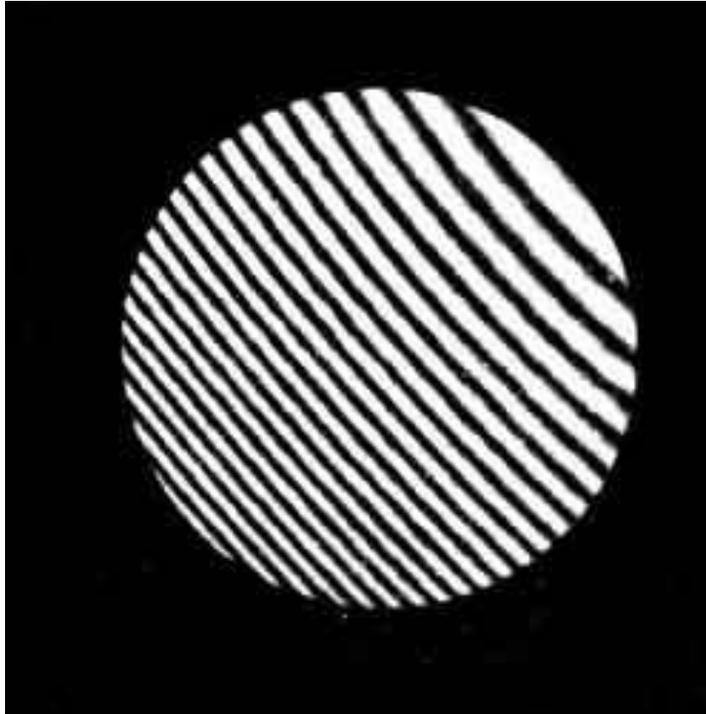


Figura 3.8.2.3.- Interferograma del espejo de un telescopio.

3.8.2.4.- ALINEACIÓN DE OBJETOS SOBRE UNA LÍNEA RECTA PERFECTA.

Es frecuente que aparezca la necesidad de tener una línea recta de referencia muy precisa en una gran cantidad de actividades ingenieriles de tipo muy diverso. Por ejemplo, la bancada o base de un torno de alta precisión debe ser tanto más recta cuanto más fino sea el torno. En este problema y muchos otros en los que se requiera alinear algo con muy alta precisión, la Interferometría es un auxiliar muy útil.

3.8.2.5.- DETERMINACIÓN MUY PRECISA DE CAMBIOS DEL ÍNDICE DE REFRACCIÓN EN MATERIALES TRANSPARENTES.

Los vidrios ópticos, plásticos o cristales que se usan en las lentes, prismas y demás elementos ópticos tienen que ser de una alta homogeneidad tanto en su transparencia como en su índice de refracción. Esto es especialmente necesario si el instrumento óptico que los usa es de alta precisión. Esta homogeneidad de los materiales transparentes se mide con la tolerancia que sea necesaria por medio de Interferometría.

3.8.2.6.- DETERMINACIÓN MUY PRECISA DE VELOCIDADES O DE VARIACIONES EN SU MAGNITUD.

Cuando una fuente luminosa se mueve respecto al observador, es bien sabido que la longitud de onda de la luz tiene un cambio aparente, alargándose o acortándose, según que el objeto luminoso se aleje del observador o se acerque a él, respectivamente. Este es el llamado efecto Doppler, que se descubrió primero para las ondas sonoras y posteriormente para la luz. Por medio de Interferometría se pueden detectar y medir variaciones sumamente pequeñas en la longitud de onda, lo que permite detectar movimientos o cambios también muy pequeños en la velocidad de un objeto. Esta propiedad se ha usado en muy diversas aplicaciones, entre otras, la medida de la velocidad del flujo de líquidos o de gases.

3.8.2.7.- MEDICIÓN DE ÁNGULOS.

Los ángulos, al igual que las distancias, también se pueden medir con muy alta precisión por medio de técnicas interferométricas. Por ejemplo, el paralelismo entre las dos caras de una placa de vidrio de caras planas y paralelas, o el ángulo recto entre las dos caras de un prisma se pueden medir con una incertidumbre mucho menor de un segundo de arco, lo que es totalmente imposible de lograr por otros métodos.

La lista podría continuarse, pero con estos ejemplos es suficiente para darnos cuenta de la enorme utilidad de la Interferometría, o sea del uso de las ondas de luz como unidad de medida.

3.9.- PELICULAS DELGADAS.

En el proceso de obtención de resultados, como objeto de estudio se utilizarán escalones de recubrimiento de Aluminio formadas por una técnica llamada "Películas delgadas".

Las técnicas de preparación de capas utilizadas están basadas en la deposición física de **Películas Delgadas** a partir de la fase vapor.

Esta técnica está basada en la formación de un vapor del material que se pretende depositar en capa delgada. Para ello, el material en forma de sólido es sometido bien sea a un proceso de calentamiento hasta la evaporación (evaporación

térmica) o bien se 'pulveriza' mediante un bombardeo intenso con partículas cargadas en forma de iones (bombardeo catódico o 'sputtering').

En este último caso, los iones proceden de una descarga eléctrica entre dos electrodos en forma de plasma, utilizando un gas generalmente inerte (argón). También es posible bombardear la muestra con un haz de iones procedentes de una fuente externa de iones. Esta última técnica permite variar la energía y la intensidad de los iones que alcanzan la superficie del material a depositar.

Alternativamente, es posible utilizar la fuente de iones para bombardear directamente la superficie del sustrato durante el proceso de evaporación, con objeto impartir más energía a los átomos evaporados y mejorar con ello las propiedades de la capa depositada (adherencia, densidad, etc.).

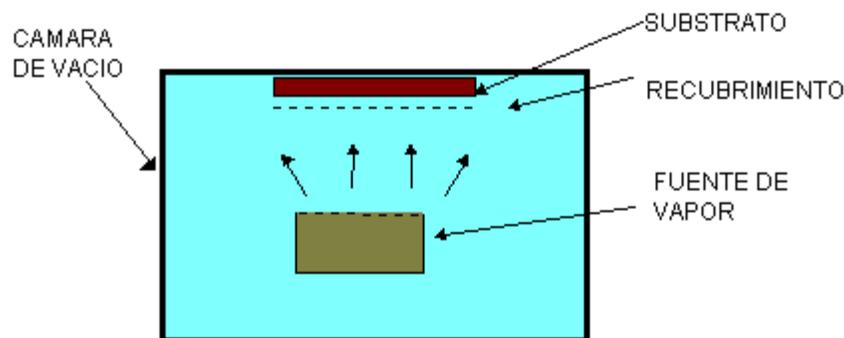


Figura 5.1.- Esquema del proceso de formación de películas delgadas.

3.10.- Procesamiento digital de imágenes

El **procesamiento digital de imágenes** es el conjunto de técnicas que se aplican a las imágenes digitales con el objetivo de mejorar la calidad o facilitar la búsqueda de información. **(8)**

Los filtros suavizantes se emplean para que la imagen aparezca algo borrosa y también para reducir ruido. Es útil que la imagen aparezca algo borrosa en algunas etapas de preprocesado, como la eliminación de los pequeños detalles de una imagen antes de la extracción de un objeto, y el relleno de pequeños espacios entre líneas o curvas (9). Dentro de éstos se encuentran el filtro promediador (lineal) y el filtro de mediana (no lineal). Este último tiene la característica de reducir ruido sin suavizar los bordes de los objetos presentes en una imagen, por lo que es muy utilizado en la actualidad (10).

El empleo de máscaras espaciales para el procesamiento de las imágenes se denomina filtrado espacial, frente al que utiliza la transformada de Fourier denominado filtrado en el dominio de la frecuencia. Este trabajo considera el estudio de dos tipos de filtros pasa bajos o suavizantes: uno lineal y otro no lineal, además de su diseño y caracterización en el dominio de Fourier, utilizando herramientas de programación adecuadas (11). Los filtros lineales, como el promediador, se basan en los conceptos que afirman que la función de transferencia y el impulso son transformadas de Fourier inversas una de otra. Caso contrario pasa con el filtro de mediana, dada su no linealidad.

El filtrado digital es una operación de convolución de la imagen original P con la función filtro H , dada por:

$$Q = H * P(1)$$

Donde Q es la imagen filtrada. Cabe recordar que, la operación de convolución hace que el filtro opere como una ventana deslizante sobre toda la matriz P , que representa digitalmente la imagen de entrada. El filtro H (o máscara) es una matriz de $N \times N$ elementos, donde N determina el grado de influencia del filtro sobre el resultado de la imagen filtrada Q . La figura 3.10.1 ilustra el filtrado en el dominio espacial con una máscara de 3×3 .

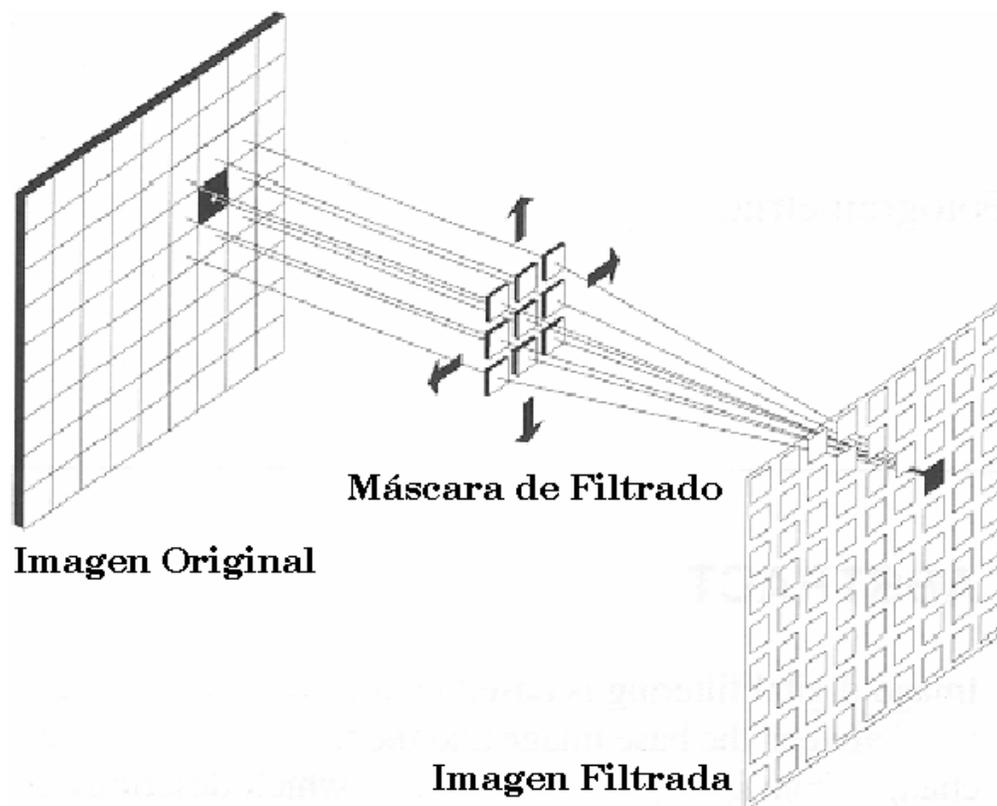


Figura 3.10.1.- Mascara de filtrado espacial (kernel) sobre una imagen.

3.10.1.- FILTRO PROMEDIADOR.

Es un filtro que utiliza como función el promedio de píxeles de una vecindad determinada. Cada píxel se sustituye por un promedio de sus píxeles vecinos (por convención: excepto los píxeles de los bordes). En la figura 3.10.1.1, se muestran las máscaras de 3×3 y 5×5 . Una de las principales dificultades de este filtro es que difumina los bordes y otros detalles de realce. Cuando el objetivo es más la reducción de ruido que el difuminado, se emplean los filtros de mediana.

1/9	1/9	1/9
1/9	1/9	1/9
1/9	1/9	1/9

(a) 3×3

1/25	1/25	1/25	1/25	1/25
1/25	1/25	1/25	1/25	1/25
1/25	1/25	1/25	1/25	1/25
1/25	1/25	1/25	1/25	1/25
1/25	1/25	1/25	1/25	1/25

(b) 5×5

Figura 3.10.1.1(a) y (b).- Máscaras para el filtraje

3.10.2.- FILTRO DE MEDIANA.

Se utiliza para reducir ruido en una imagen, igual que en el caso del filtrado por la media. Sin embargo suele funcionar mejor ya que conserva detalles significativos de la imagen. La mediana m de un conjunto de valores es tal que la mitad de los valores del conjunto quedan por debajo de m y la otra mitad por encima. En este caso, el nivel gris de cada píxel se reemplaza por la mediana de los niveles de gris en un entorno de este píxel, en lugar del promedio de éstos. Este filtro no lineal posee la característica de preservar la agudeza de los bordes en el proceso de reducción de ruido.

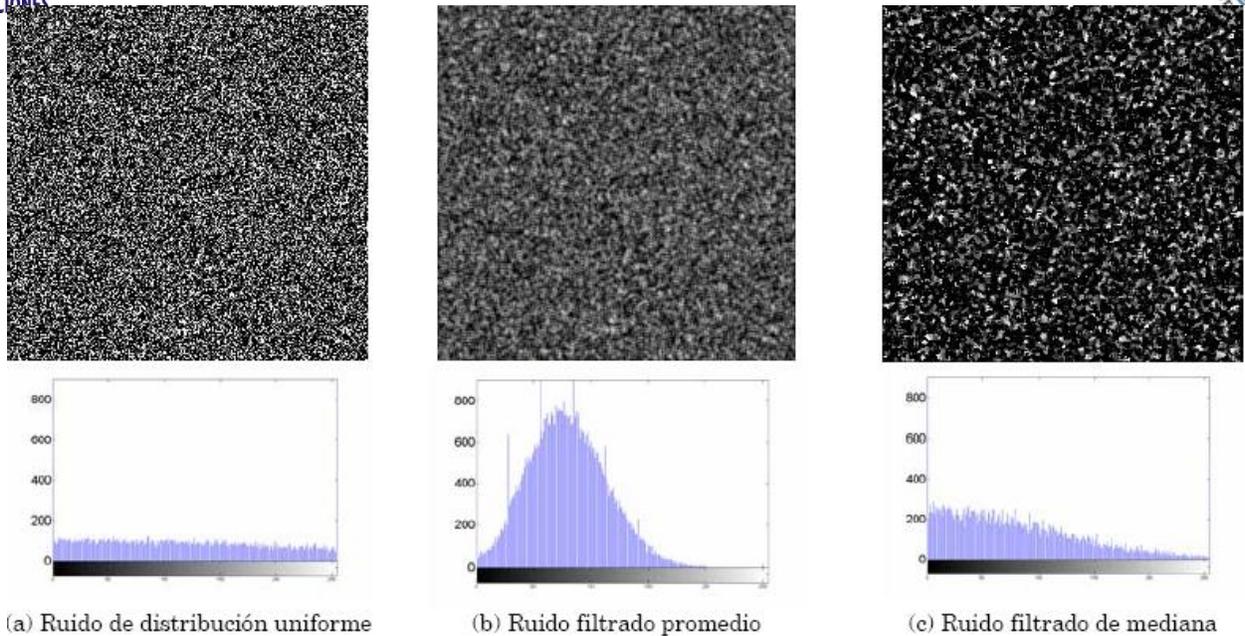


Figura 3.10.2.1.- Comparación de una reducción de ruido con filtrado promedio y de mediana de vecindad 3X3.

La figura 3.10.2.1 muestra visualmente la diferencia que existe entre estos dos filtros. El proceso de realizar la sustitución de cada pixel por el promedio del entorno asociado a éste, origina una concentración de los pixeles de la imagen (a) hacia las intensidades de grises medios oscuros. Por esta razón, se dice que este filtro tiene un efecto difuminador sobre una imagen, puesto que disminuye el contraste entre las zonas oscuras y las claras (imagen (b)), además, como promedia los valores del entorno al pixel a sustituir, inventa nuevas intensidades de gris. En cambio, el filtro de mediana ha reemplazado los pixeles de intensidad de gris más claro por los de gris más oscuro, sin inventar una nueva intensidad de gris, disminuyendo el efecto de suavizado en la reducción de ruido, como se puede observar en la imagen (c) y en el histograma asociado a ésta.

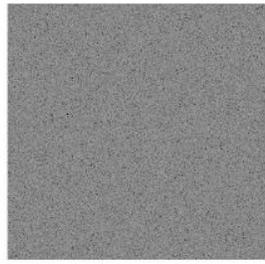
3.10.3. - FILTRADO EN EL DOMINIO DE FOURIER

El filtrado en el dominio de la frecuencia es muy sencillo, poderoso y flexible. Los filtros definidos en el dominio espacial en realidad tienen su repercusión en el de la frecuencia. De ello deriva la terminología empleada cuando se habla de filtros de paso alto o bajo. Los términos se refieren a que retienen bajas o altas frecuencias, explicando precisamente el efecto que causan en el espacio frecuencial de la imagen. Transformando la imagen del dominio espacial al de la frecuencia, la convolución entre H y P será sustituida por el producto:

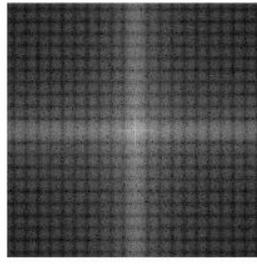
$$Q(u, v) = H(u, v)P(u, v) \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.10.2.1}$$

Siendo $Q(u, v)$, $H(u, v)$ y $P(u, v)$ las FFT de la imagen filtrada Q , la función filtro H y la imagen original P , respectivamente.

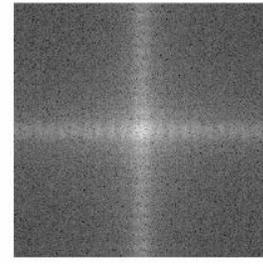
Las ideas de pérdida de nitidez por reducción del contenido de altas frecuencias o de mejor definición incrementando la magnitud de las componentes de alta frecuencia en relación con las de baja frecuencia proceden de conceptos directamente relacionados con la transformada de Fourier. De hecho, esta idea es bastante más atractiva e intuitiva en este dominio.



(a) Ruido de distribución uniforme



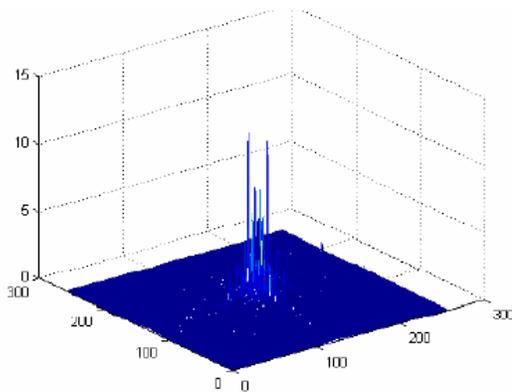
(b) Ruido filtrado promedio



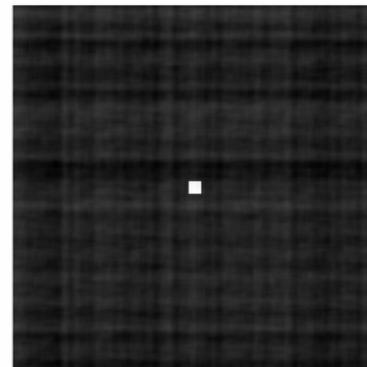
(c) Ruido filtrado de mediana

Figura 3.10.3.1.- Módulo de la FFT de la imagen de ruido y de las imágenes filtradas por una máscara de 21 x 21.

Se observa en la figura 3.10.3.1, que las imágenes filtradas concentran la mayor parte de su energía en las bajas frecuencias, recordando que las zonas más claras denotan la mayor magnitud de la transformada de Fourier, y que el origen de este dominio está ubicado en el centro de la imagen. Claramente se está en presencia de un filtrado paso bajo.



(a) Dominio de Fourier



(b) Dominio espacial

Figura 3.10.3.2.- Filtrado promediador con una máscara de 9 x 9

CAPITULO VI

4.1.- PROBLEMAS A RESOLVER, PRIORIZÁNDOS

Abrir caminos en esta área de la investigación que en México no se ha desarrollado y competir con diferentes instituciones a nivel mundial.

Familiarizarme con la óptica, entender los conceptos de todo lo relacionado con Interferometría para poder comprender con lo que se va a trabajar y como se va a hacer.

Al ser este un trabajo de investigación no se puede decir a ciencia cierta cuáles serán los resultados que se obtendrán, en el camino a encontrar resultados se pueden presentar diversos tropiezos, por ejemplo, al ser el objetivo de microscopio interferencial Tipo Michelson un objeto de reciente adquisición no se conoce experimentalmente su funcionamiento ni rendimiento. Lo único que se puede decir, es que se buscar buenos resultados mientras sea posible.

4.2.- ALCANCES Y LIMITACIONES

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 serán aplicadas en sistemas construidos con materiales nano-estructurados, en control e inspección en la industria de los microcircuitos y los MEMS.

Con esto se tendrá capacidad 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.

Algunas limitaciones serian que no se cuenta con vasta experiencia en la Interferometría microscópica.

CAPITULO V

"IMPLEMENTACION DE LA SOLUCION Y/O PRESENTACION DE RESULTADOS"

5.1.- PROCEDIMIENTO Y DESCRIPCIÓN DE LAS ACTIVIDADES REALIZADAS

Implementación de un Objetivo de Microscopio Interferencial tipo **Michelson** para el armado de un arreglo interferométrico tipo Michelson.

Para la calibración del sistema y la determinación de topografía de la superficie de alguna muestra, se utilizan escalones de recubrimiento de Aluminio de diferentes alturas; dichos escalones son hechos en el área de "Películas delgadas" del CIO.

Dicho interferómetro consta de las siguientes partes: Laser, Filtro Espacial (Montura, Objetivo de Microscopio y Pinhole), Colimador de Haz, Cubo Divisor

de Haz, Objetivo de Microscopio interferencial Tipo Michelson, Cámara CCD y Objeto a Analizar, cuyas descripciones se anexan (**anexo 2**).

Para el armado de dicho interferómetro se llevó a cabo una metodología la cual es la siguiente:

1. Se ensambla el laser a una montura y se fija a un extremo de la mesa neumática por medio de tornillos. Con la ayuda de un diafragma se procedió a alinear correctamente haz de luz del laser mediante la regulación de la posición al girar unos tornillos localizados en la parte delantera y trasera del laser, hasta hacer pasar el haz de luz por en medio del diafragma, tomando como referencia una línea a lo largo de la mesa de trabajo, debido a que este debe ser paralelo a la mesa en todo momento; este proceso se lleva a cabo fijando el diafragma primeramente en una posición cercana al laser hasta otra posición la más alejada dentro de lo posible en la mesa neumática.

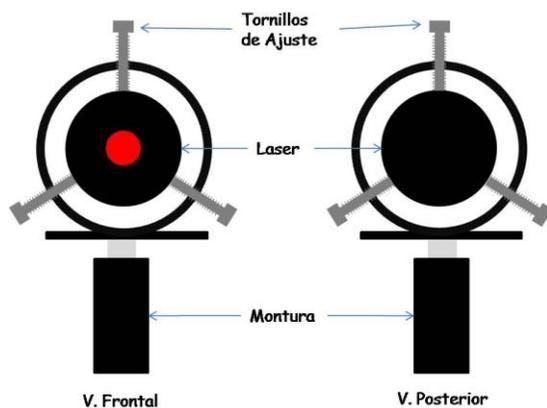


Figura 5.1.1.- Diagrama del Laser y Montura.

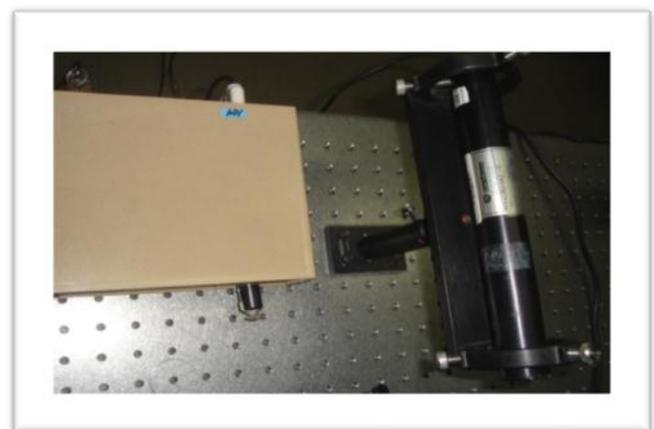


Figura 5.1.2.- Fijado del Laser a la mesa de trabajo.

2. Fijar una montura especial en la mesa, en dicha montura se enrosca el objetivo de microscopio, el cual hace más grande el haz de luz para poder iluminar mayor área, acto seguido, se verifica que estos estén a la altura y posición adecuada para que su reflejo este en la misma dirección del haz de luz. Enseguida se coloca el Pinhole ajustando tanto la distancia entre este y el objetivo de microscopio como desplazamientos horizontales y verticales, por medio de unos tonillos milimétricos hasta que el haz de luz atraviese correctamente por él y su intensidad sea la mayor.



Figura 5.1.3.- Objetivo de Microscopio

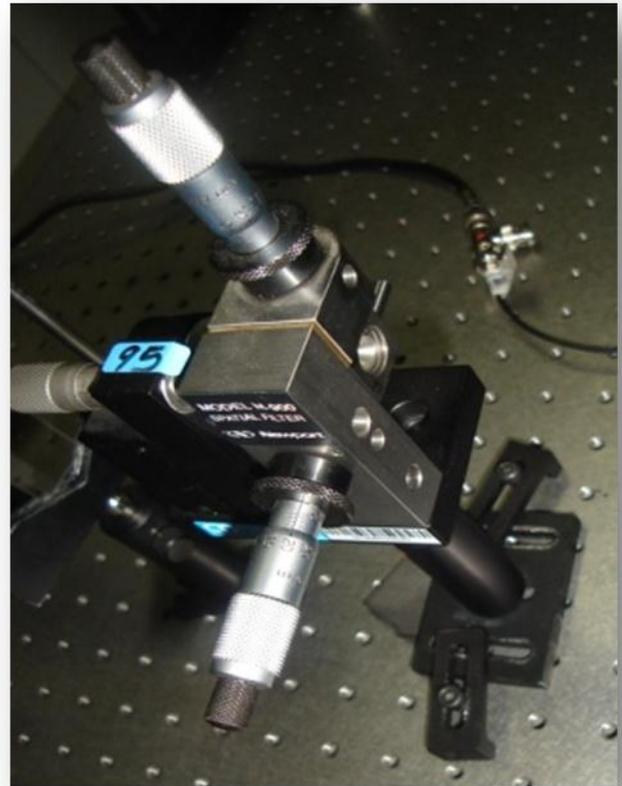


Figura 5.1.4.- Filtro espacial

3. Fijar ahora a la mesa neumática el colimador de haz, este colocado a su distancia focal (si esta se desconoce la podemos encontrar alejando o acercando el colimador hasta verificar que el haz de luz que lo atraviesa no cambie en ningún momento de tamaño), este se utiliza para que el haz de luz que lo atraviesa no cambie de tamaño en ningún momento. Respectivamente el colimador se alinea de modo que el haz no cambie de dirección y el reflejo de éste también coincida con el haz del láser, esto se hace sin el objetivo ni el Pinhole.



Figura 5.1.5.- Colimador de Haz

4. Colocar el cubo divisor de haz, el cual que envía una parte de la luz a la superficie de la muestra y otra parte a una superficie de referencia. Este también se debe linear correctamente colocando el diafragma antes del cubo y verificando que su reflejo converja en el mismo punto del haz de luz, esto se realiza para que la luz que pasa por él esté en la misma dirección y no ocasione frecuencias de interferencia que sean perjudiciales.

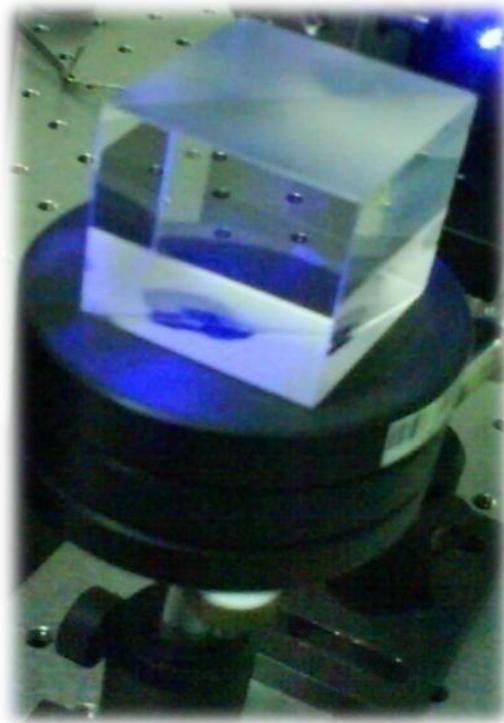


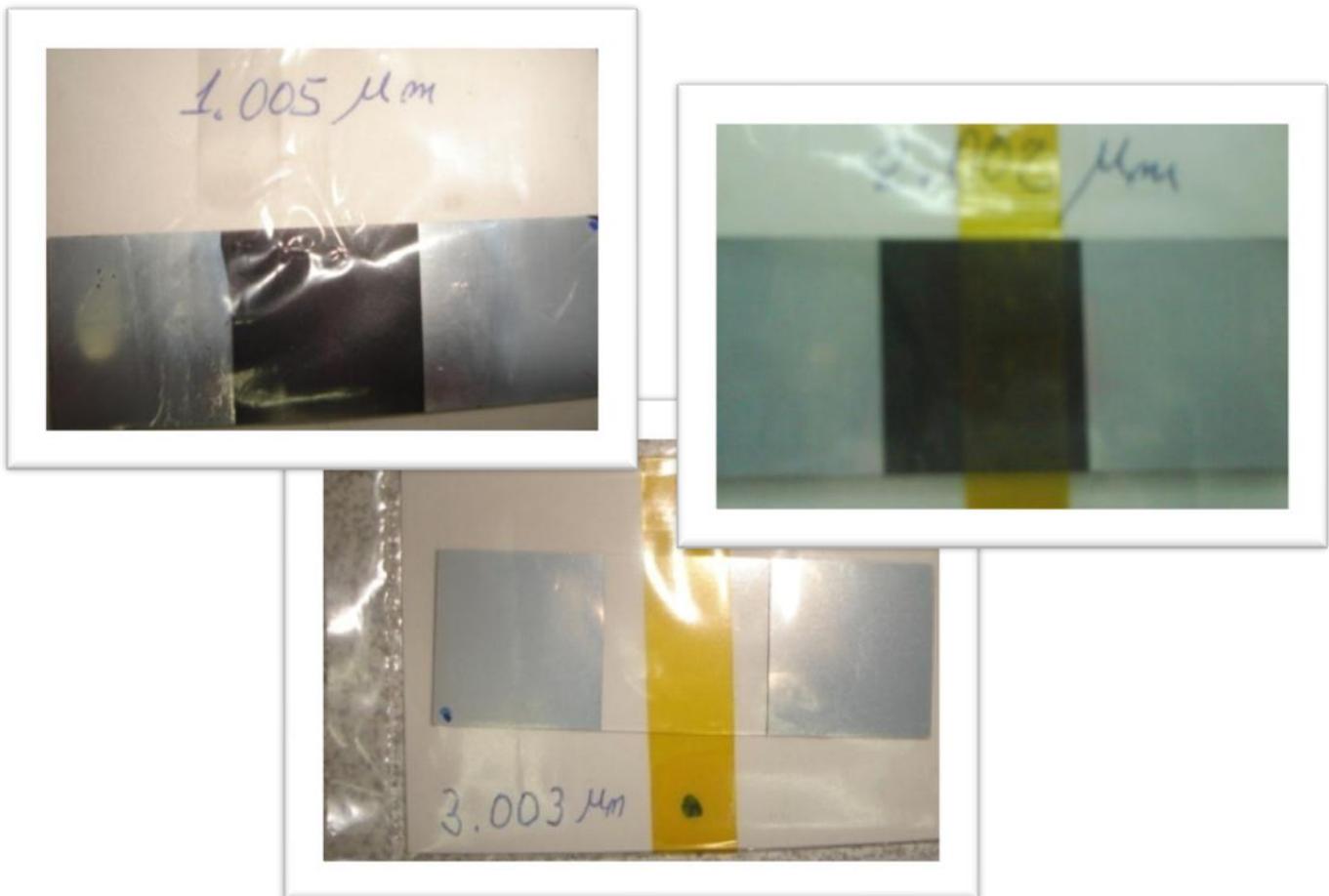
Figura 5.1.6.- Cubo divisor de haz

5. El Objetivo de Microscopio Interferencial tipo Michelson se coloca en una montura adecuada y se asegura, acto seguido se coloca en una posición seguida de uno de los lados del cubo divisor de haz que está enviando luz, luego se fija en una en una posición cercana al cubo y se debe alinear debidamente con el haz que recibe y el que éste mismo proyecta con el resto del arreglo para obtener un buen resultado.



Figuras 5.1.7.- Objetivo de Microscopio Interferencial tipo Michelson

6. El objeto de estudio o muestra se fija en un actuador piezoeléctrico el cual es controlado mediante una PC (los PZT's de este se deforman de acuerdo a una diferencia de potencial a la cual se someten), el conjunto se fija a la mesa neumática en una posición muy cercana al objetivo interferencial en la cual se logran visualizar las líneas de interferencia.



Figuras 5.1.8, 5.1.9 y 5.1.10.- Escalones 1, 2 y 3 respectivamente, con recubrimiento de películas delgadas de aluminio de 1.005, 2.002 y 3.003 nm respectivamente.

7. La cámara CCD se coloca en el extremo opuesto del lado del cubo divisor en el que se puso el objetivo, y por medio de un cable coaxial podemos conectarlo a una tarjeta digitalizadora de imágenes instalada en la computadora para observar las franjas de interferencia que producen el haz de luz que refleja la muestra y el de la referencia del objetivo.

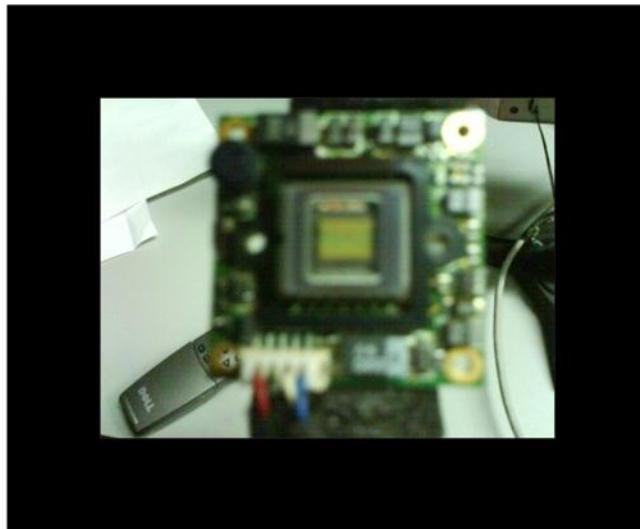


Figura 5.1.11. Cámara CCD con resolución de 640 x 480 píxeles.



Para obtener mejores resultados, se pinto la cara posterior de los escalones con pintura de lata color negra, esto evitaría que en su mayoría dicha cara refleje la luz e interfiera con el resultado esperado.

En el armado de dicho Interferómetro se llevó a cabo la meticulosa alineación de cada uno de sus componentes, como antes se mencionó, lo cual demanda muchísimo tiempo por ser un trabajo muy fino; para con ello conseguir una buena calidad de franjas de interferencia. Adicionalmente a todo esto colocamos un atenuador de luz debido a que la cantidad de luz que incidía en la cámara CCD era exagerada, lo cual ocasionaba una calidad de imagen poco agradable.

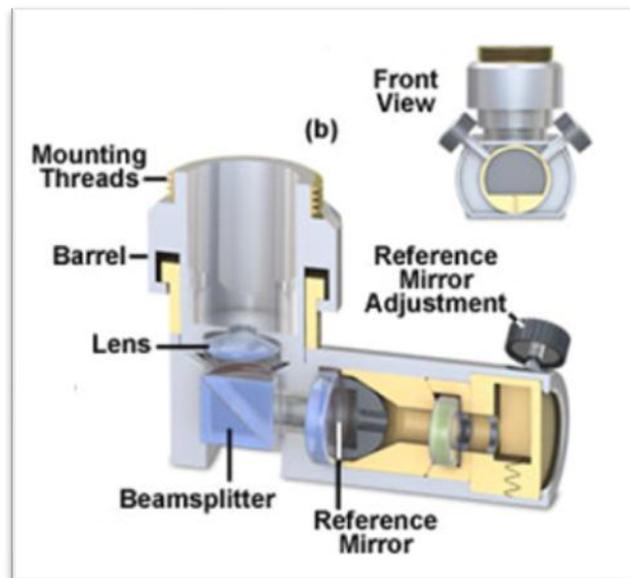


Figura 5.1.12. Diagrama de cómo está constituido el objetivo de microscopio interferencial tipo Michelson

El diseño del objetivo interferencial de bajo aumento, este es 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 largo (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 (7).

Como se puede observar en la figura 5.12, el objetivo de microscopio interferencial tipo Michelson contiene un cubo divisor de haz el cual envía una parte de luz a un espejo de referencia, este espejo tiene unos tornillos de ajuste para encontrar la posición adecuada para generar la interferencia; al mismo tiempo el cubo divisor deja pasar otra parte de luz hacia afuera este es el que incidirá en la muestra. Al superponerse el haz que refleja el espejo y la muestra, se generará la interferencia.

OBSERVACIONES:

Primeramente se trato de enfocar perfectamente el escalón procurando observar al mismo tiempo franjas de interferencia, con lo cual fue necesaria la ayuda de una fuente de luz blanca (proyector) para encontrar dicho escalón (figura 5.13) , al ver que con la cámara utilizada no se podía llegar a enfocar dicho objetivo, se procedió a utilizar otra diferente (figura 5.15) con mayor calidad de imagen (esto significa introduce menor cantidad de ruido); con todo lo mencionado anteriormente no se pudieron visualizar las franjas de interferencia ni el escalón al mismo tiempo (véase figura 5.14) debido a que por ser dicho objetivo de microscopio interferencial parte de microscopios de cierta marca (Nikon), este requiere de **óptica adicional** para conseguir un buen enfoque.

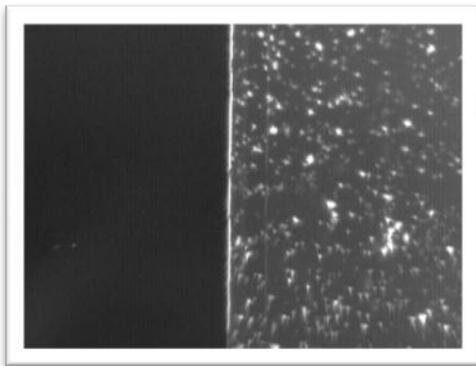


Figura 5.1.13.- Enfoque del escalón con luz blanca. Nótese dos secciones de la imagen, una totalmente oscura y la otra en la cual está depositada la película delgada.

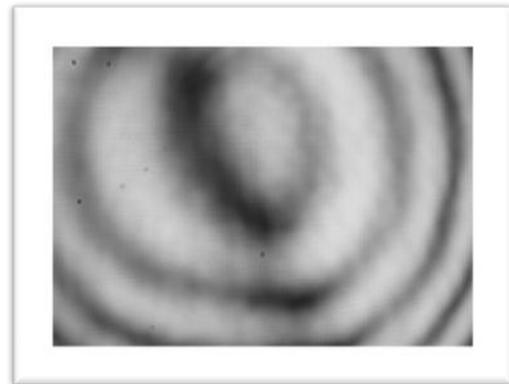


Figura 5.1.14.- Enfoque del escalón con el laser. Nótese que no se visualiza el escalón ni una buena calidad de franjas de interferencia

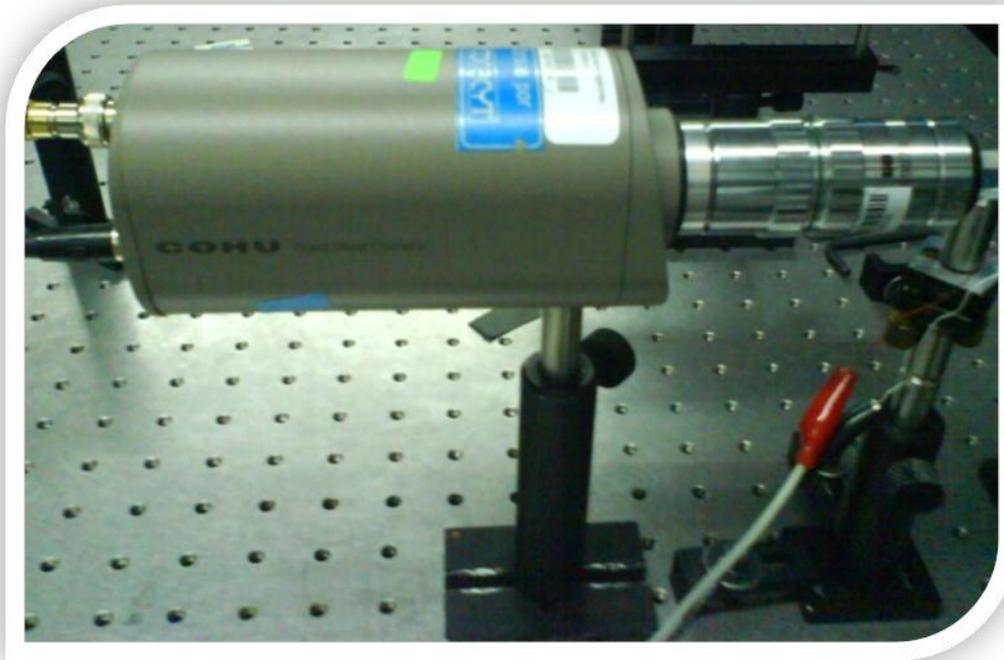


Fig
ura
5.
1.
15
.-
Cá
ma
ra
CC

D con resolución de 640 x 480píxeles

Al ver que de la manera comentada anteriormente no se pudo conseguir ningún resultado, se procedió a armar el interferómetro de otra manera, reemplazando el Objetivo de Microscopio Interferencial, para armar el arreglo de una manera diferente, mediante la implementación de un espejo como haz de referencia, como se indica en la figura siguiente:

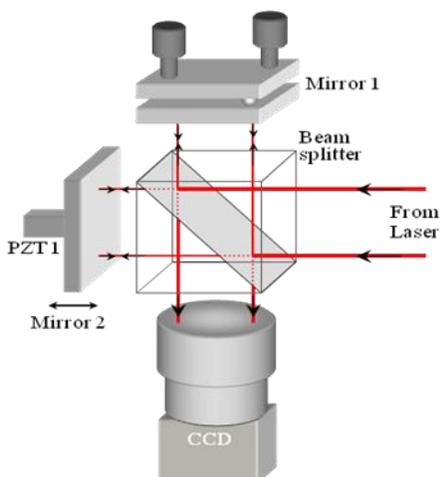


Figura 5.1.16.- Diagrama de la nueva configuración del interferómetro tipo Michelson, El espejo de referencia corresponde al Espejo 2 y en la posición del Espejo 1 se colocó la muestra.

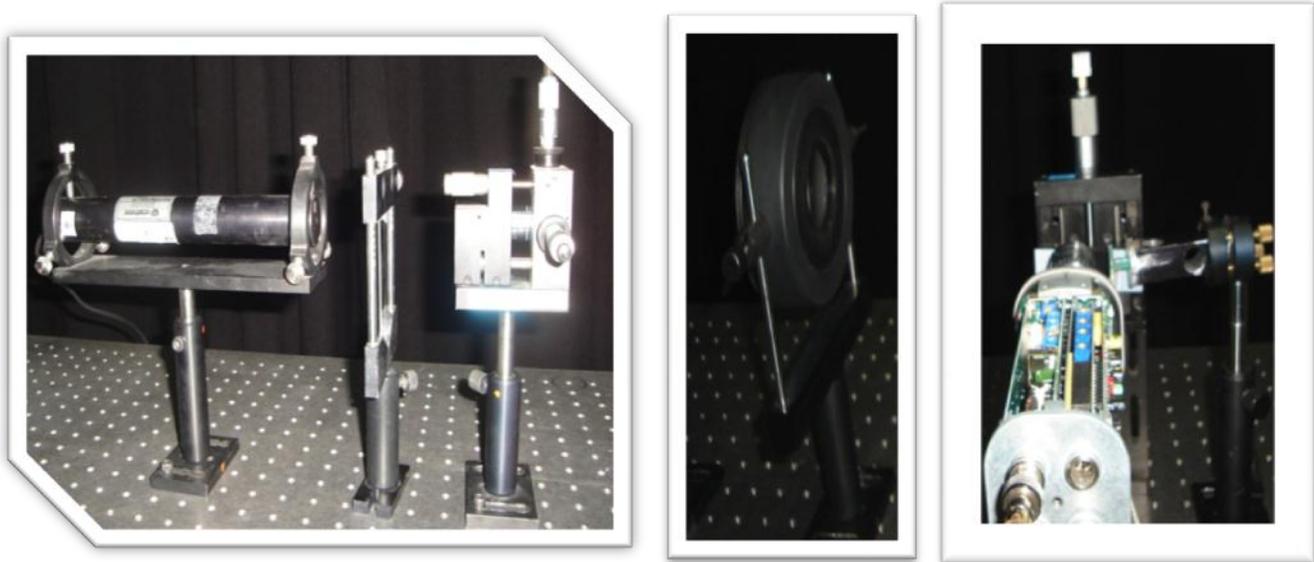


Figura 5.1.17.- Arreglo del interferómetro Tipo Michelson

Una vez hecho esto se enfocó el escalón y se observaron también las líneas de interferencia, luego se realizó la conexión del actuador piezoeléctrico a un regulador de voltaje, este a su vez a la tarjeta digitalizadora y posteriormente se hizo un **phase stepping**, por medio de un programa en **LabView** con el cual se obtiene el voltaje adecuado para el phase stepping y automáticamente manda señales eléctricas al regulador de voltaje y captura el Interferograma (imágenes de la interferencia) en cada avance realizado, con esto se obtuvieron algunas imágenes, de las cuales se anexa en el punto 5.2 el proceso que se realizó para llegar a buenos resultados.

Con fines de saber de qué tamaño era el espacio del escalón que logramos observar con la cámara, usamos una tarjeta de resolución, la cual al enfocarla bien con la cámara nos dio un patrón el cual indica que se visualizan 16 líneas por milímetro, en un espacio que consta de 360 x 360 pixeles, tenemos también que 1 línea (un

espacio blanco y un espacio negro) ocupa 17 píxeles de la imagen. Al hacer las operaciones pertinentes tenemos que el espacio observado es de 1.3235 mm:

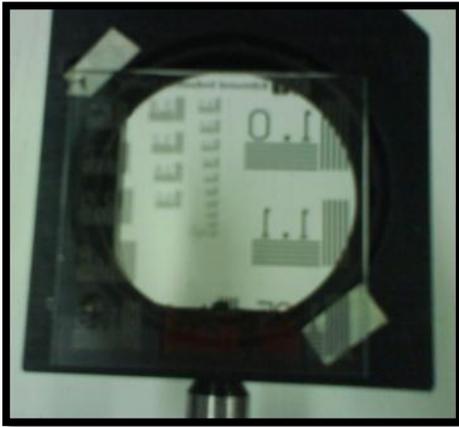


Figura 5.1.18.- Tarjeta de Resolución.

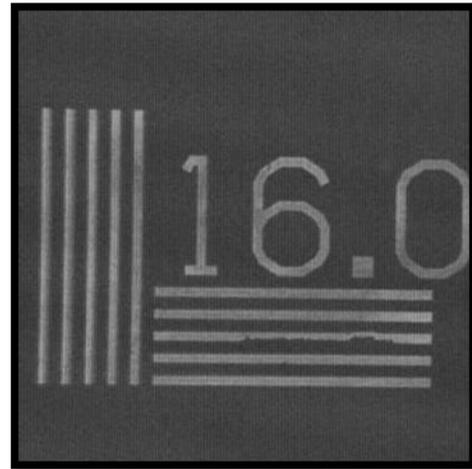


Figura 5.1.19.- Enfoque del patrón de medida de la tarjeta de resolución.

$$\#lin = \frac{(360\text{ pix})(1lin)}{(17\text{ pix})} \quad mm = \frac{(\#lin)(1mm)}{(16lin)}$$

$$mm = 1.3235$$

Se obtuvieron Interferograma de todos los escalones, notando que para el segundo escalón se obtuvieron mejores resultados debido a que el primer y tercer escalón por contaminación y suciedad presentaban muchos errores, entonces se procedió a lo siguiente:

Se hizo un barrido de ambos lados del escalón a lo largo de este para después promediarlo y con esto obtener una medición estándar del escalón.

Para tener una idea acerca de las dimensiones del escalón medido, podemos hacer un cálculo por conteo de franjas mediante la siguiente fórmula:

$$d = \frac{n\lambda}{2} \longrightarrow \text{Ecuación 5.1.1}$$

Donde:

d = Espesor del escalón (en nanómetros)

n = Número de Franjas observadas

λ = Longitud de onda del laser

5.2.- RESULTADOS, PLANOS, GRÁFICAS, PROTOTIPOS Y PROGRAMAS

Para poder obtener la medida exacta del 2° escalón analizado, se realizó el procesamiento de las imágenes en MathCad, al igual que el promediado de todas ellas y el resultado fue: **Medida del escalón = 1.87 micras.**

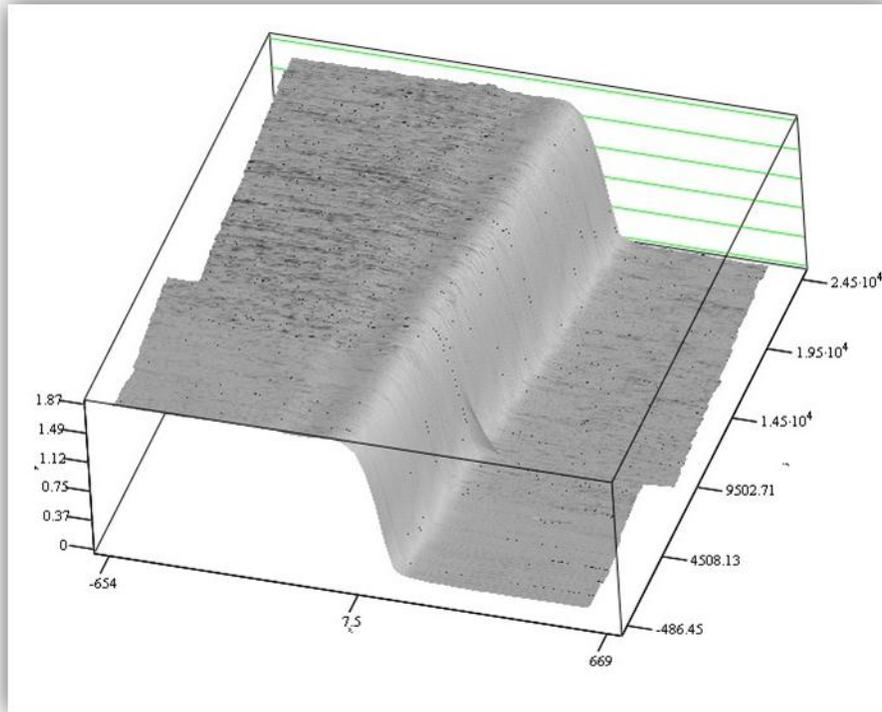


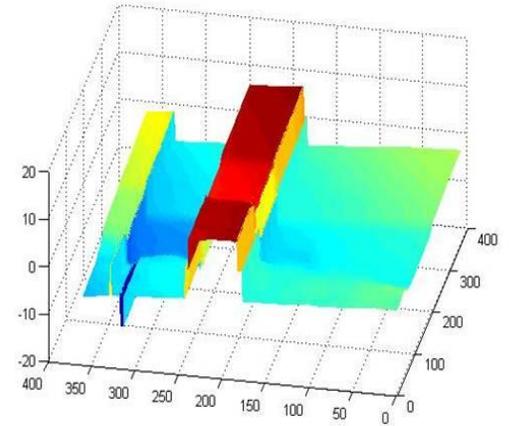
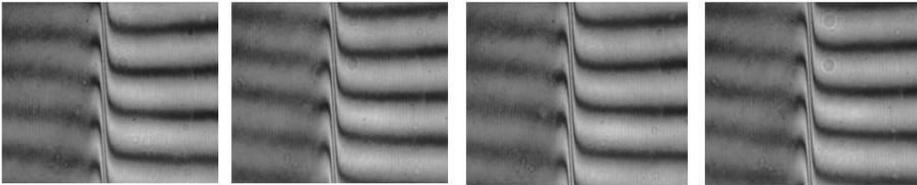
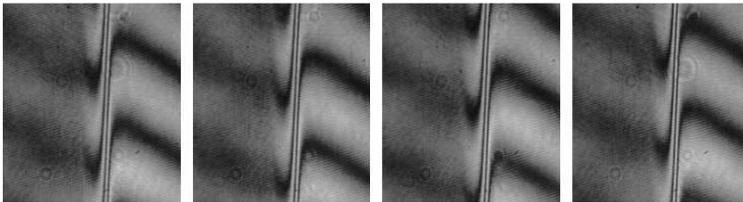
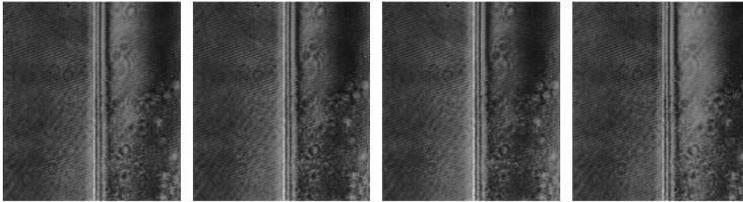
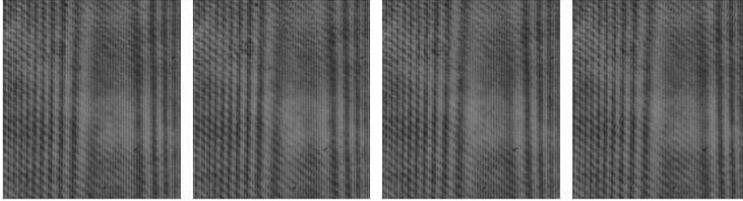
Figura 5.2.1.- Resultado del escalón después de su procesamiento en MathCad.

Con motivo de comparar resultados, se mandó el segundo escalón al laboratorio de metrología dimensional para su revisión con otra técnica llamada **"Medición por coordenadas"**, que esta validado por el patrón nacional de longitud y así saber que tenemos un sistema calibrado.

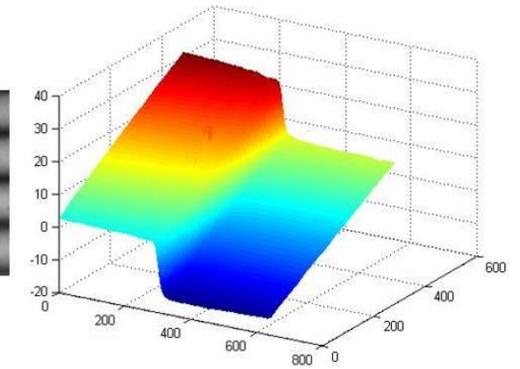
El Proceso por el cual se avanza para llegar a resultados convincentes fue tomando imágenes del corrimiento de fase del escalón para ambos lados de este, tratando de visualizar la menor cantidad de franjas de interferencia, la menor cantidad de ruido e interferencia no proveniente de la referencia y la muestra. Esto se repitió para cada uno de los escalones, a continuación expongo las imágenes capturadas (se mostrarán solamente

PRIMER ESCALÓN (Lado Derecho)

P S
h t
a e
s p
e p
i
n
g

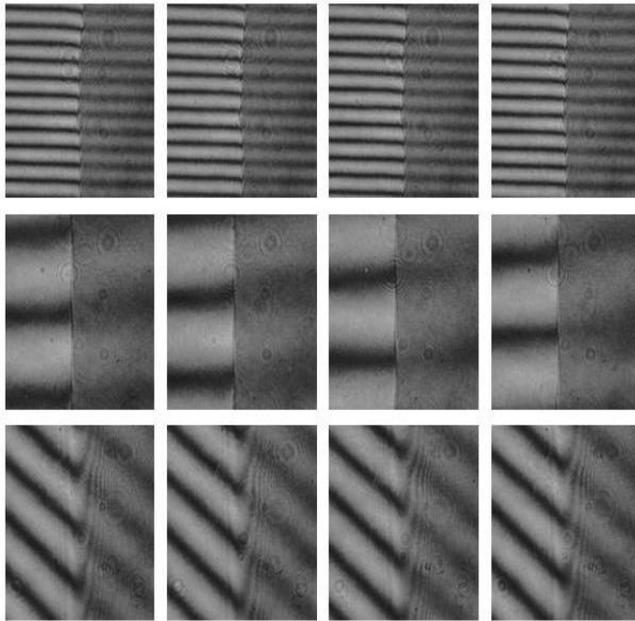


Fase Desenvuelta

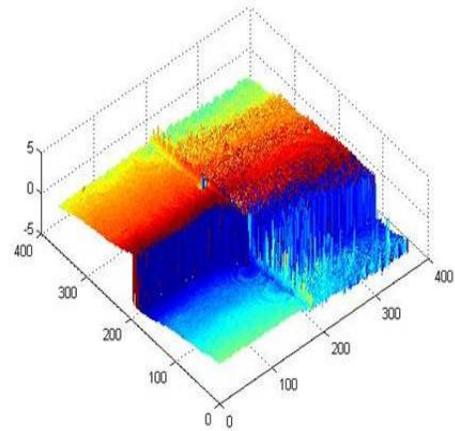


PRIMER ESCALÓN (Lado Izquierdo)

P
h
a
s
e
p
i
n
g

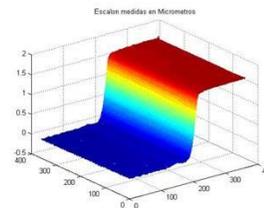
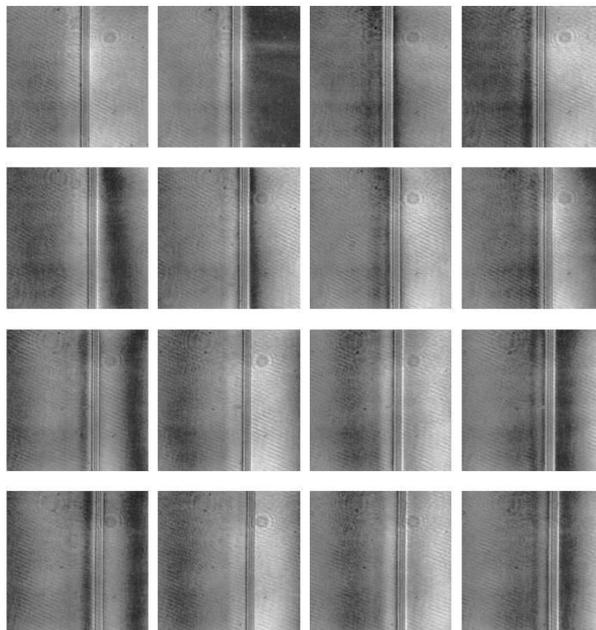


Fase Desenvuelta

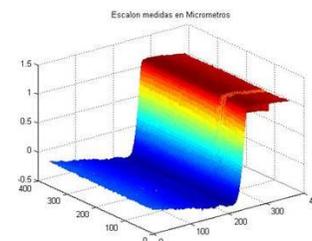


SEGUNDO ESCALÓN (Lado Derecho)

S
t
e
p
h
a
s
e
p
i
n
g

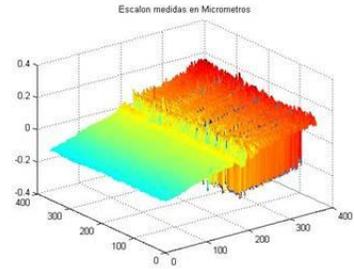
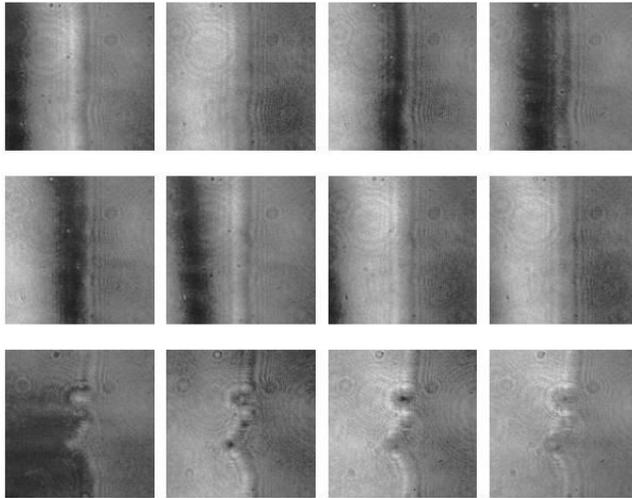


Fase Desenvuelta

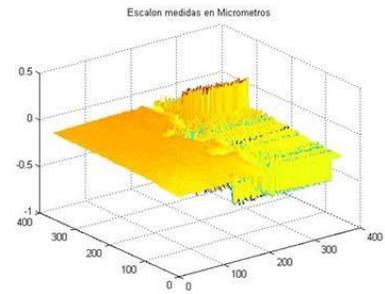


SEGUNDO ESCALÓN (Lado Izquierdo)

S
t
e
p
p
i
n
g

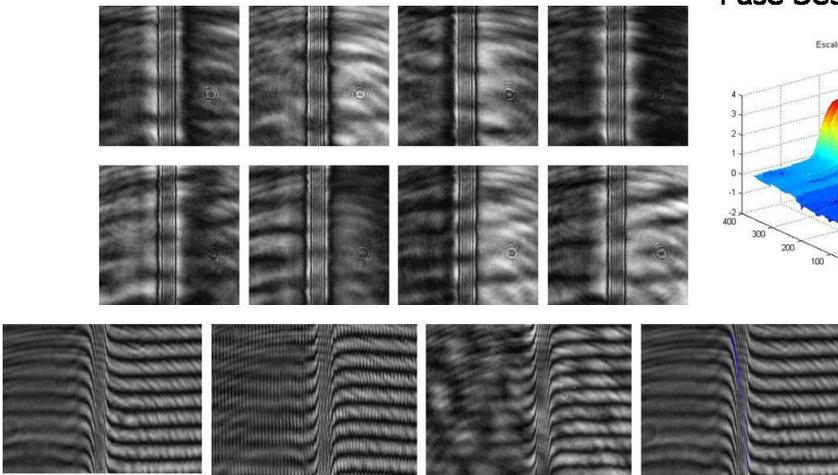


Fase Desenvuelta

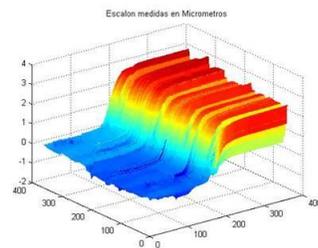


TERCER ESCALÓN (Lado Derecho)

P
h
a
s
e
p
i
n
g

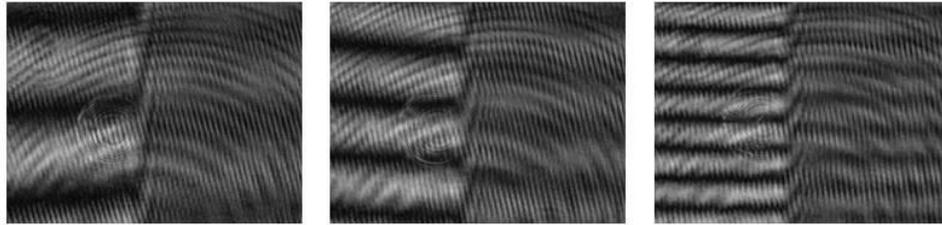
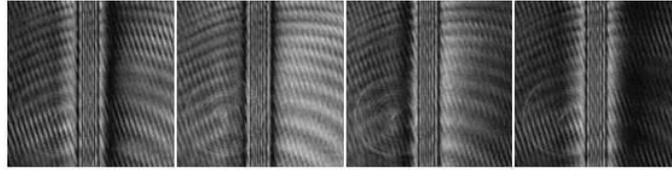


Fase Desenvuelta

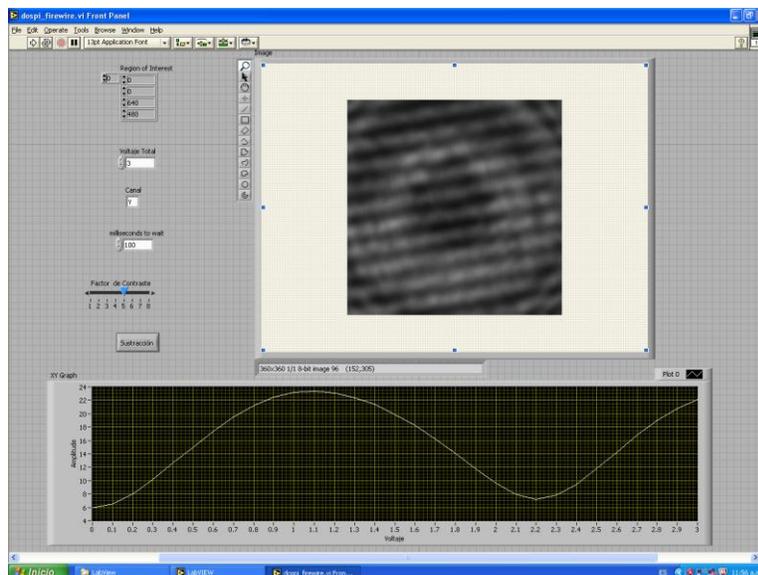
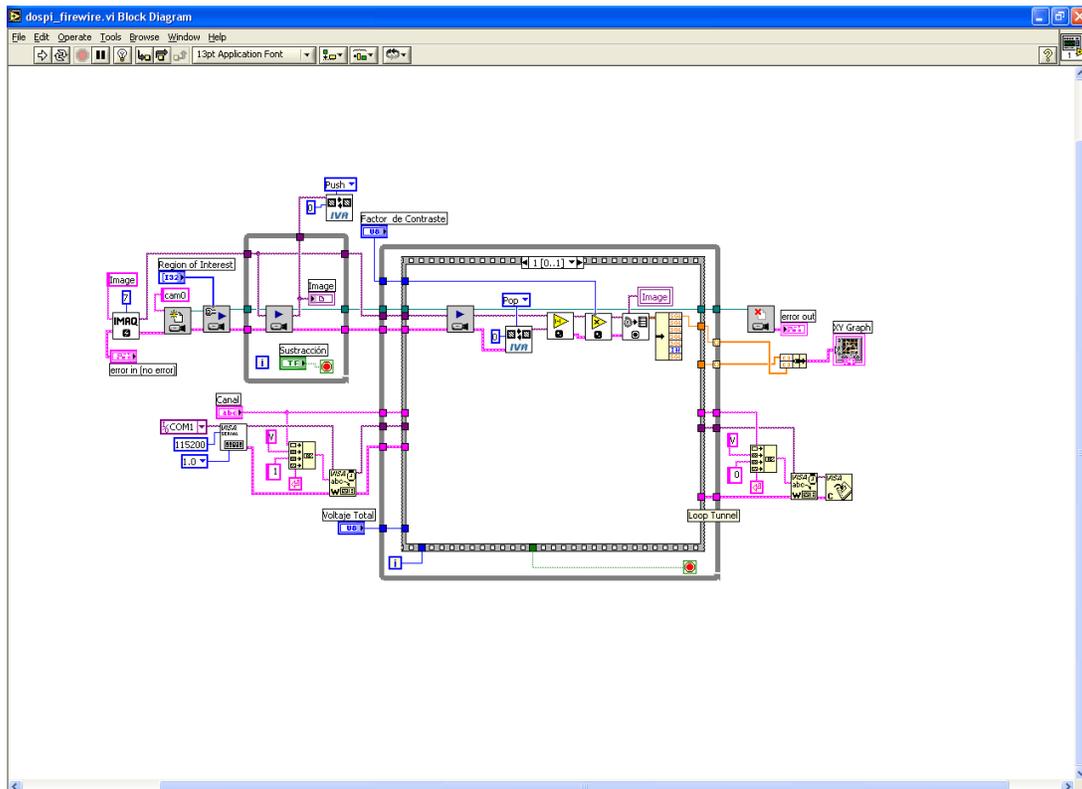


TERCER ESCALÓN (Lado Izquierdo)

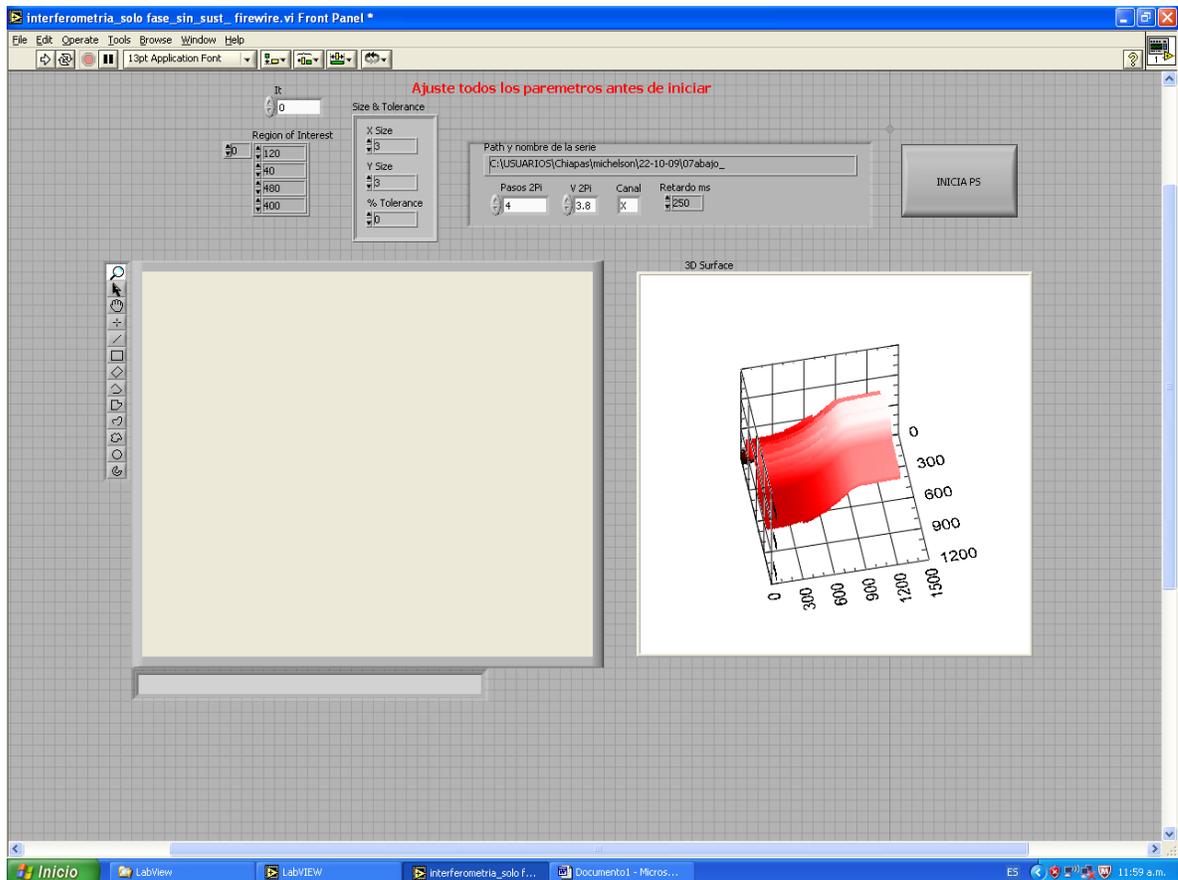
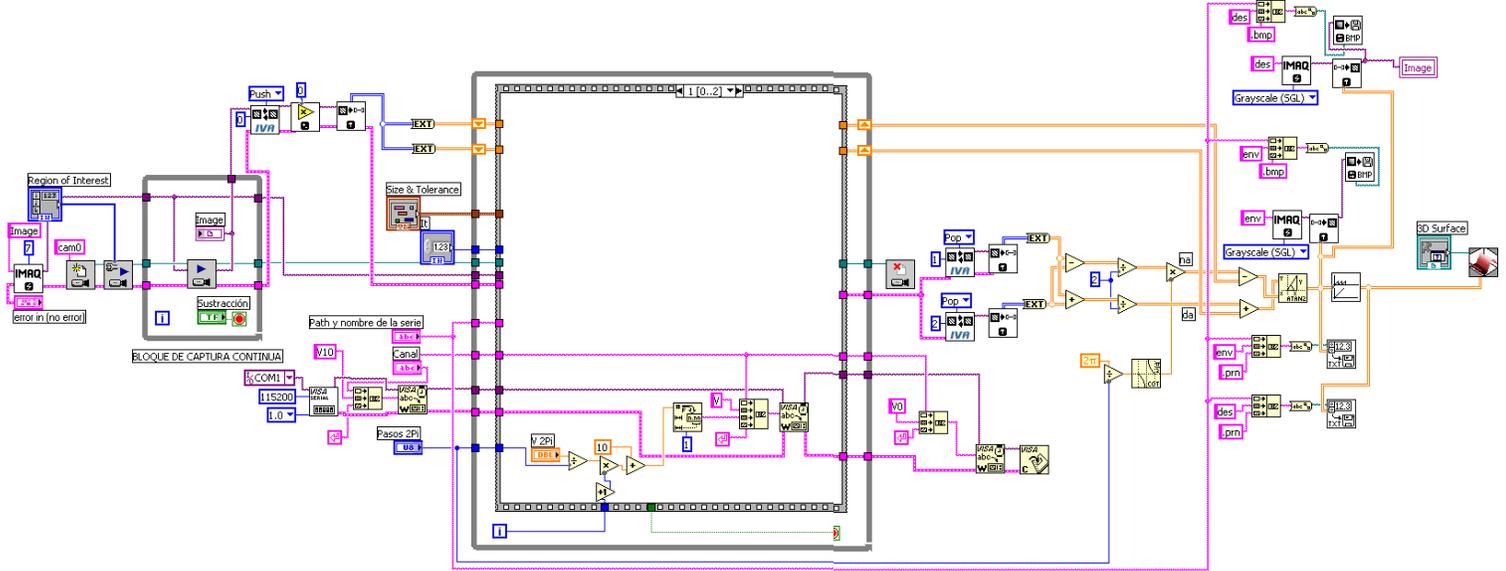
P S
h t
a e
s p
e p
i
n
g



La obtención de los datos automáticamente, fue realizado gracias al apoyo de un programa en LabView realizado por el Ing. Juan Antonio Rayas el cual presento a continuación: Con este programa obtenemos el voltaje necesario para completar el phase Stepping.



Con este programa se realiza el Fase Stepping, se capturan las imágenes y nos arroja también una fase envuelta y desenvuelta.



Realice programas en MatLab para procesar las imágenes obtenidas. Este consiste en calcular la fase envuelta del sistema, calcula también el seno y el coseno de la fase envuelta, esto para poder aplicarle un filtro promediador a cada una de estas matrices con un kernell de 3X1 (tres filas X 1 columna) y con esto calcular la matriz tangente, que representa la misma fase envuelta pero filtrada, una vez teniendo esto puede calcular la fase desenvuelta del sistema, mostrarla en imágenes en 2-D y 3-D, convierte la escala mostrada a Micrómetros y por ultimo guarda los datos en un archivo en código ASCII.

A continuación anexo el código de programación y las ventanas en las cuales se muestran las imágenes obtenidas por el programa.

```
% Procesamiento Digital de Imágenes (Escalón 2)
%By: Galdino López Solís

Clear all; clc;

% Leyendo las Imágenes de PS y Convierte a formato double p/poder
realizar operaciones con las matriz de datos

f1=imread('C:\Documents and Settings\Administrador\Mis
documentos\MATLAB\segundo escalón\01_1.bmp'); I1=double(f1);
f2=imread('C:\Documents and Settings\Administrador\Mis
documentos\MATLAB\segundo escalón\01_2.bmp'); I2=double(f2);
f3=imread('C:\Documents and Settings\Administrador\Mis
documentos\MATLAB\segundo escalón\01_3.bmp'); I3=double(f3);
f4=imread('C:\Documents and Settings\Administrador\Mis
documentos\MATLAB\segundo escalón\01_4.bmp'); I4=double(f4);

%Calcular la Fase envuelta normal

Figure (1)
subplot (2,3,1);
phi = atan2(-(I2-I4), (I1-I3+0.0000000001));
w = mat2gray(phi);
imshow(w, [ ]); title ('1. Fase Envuelta S/N Filtro');

%Matrices Seno Coseno
```

```

s=sin(phi);
c=cos(phi);

subplot (2,3,2);
imshow (s, [ ]); title ('2. Matriz de Senos');
subplot (2,3,5);

imshow (c, [ ]); title ('3. Matriz de Cosenos');

%Filtro Promediador para el seno y coseno

for i = 1:1
    h = fspecial('average',[3 1]);
    s1 = imfilter(s,h);
end

for i = 1:1
    h = fspecial('average',[3 1]);
    c1 = imfilter(c,h);
end

subplot (2,3,3);
imshow (s1, [ ]); title ('4. Matriz de Senos c/FP');

subplot (2,3,6);
imshow (c1, [ ]); title ('4. Matriz de Cosenos c/FP');

%Fase Envuelta Filtrada

figure (2)
FE=atan2(-s1,c1);
imshow(FE, [ ]); title ('5. Fase Envuelta Filtrada');
impixelinfo;

%% Desenvolviendo la Fase

figure (3)
Q1=unwrap(FE);
QTrans=Q1.';
Q2=unwrap(QTrans);
QDes=Q2.';
subplot(1,2,1);
imshow (QDes, [ ]); title('Fase Desenvuelta 2-D');
subplot(1,2,2);
mesh(QDes); title('Fase Desenvuelta 3-D');

%Convierte a Micrometros

z=(QDes*0.633)./(4*pi);
figure(4)
mesh(z); title('Escalón medidas en Micrómetros');

%% Guarda la imagen del escalón sin "Errores"

```

```
%save escalón E -ASCII -tabs;
```

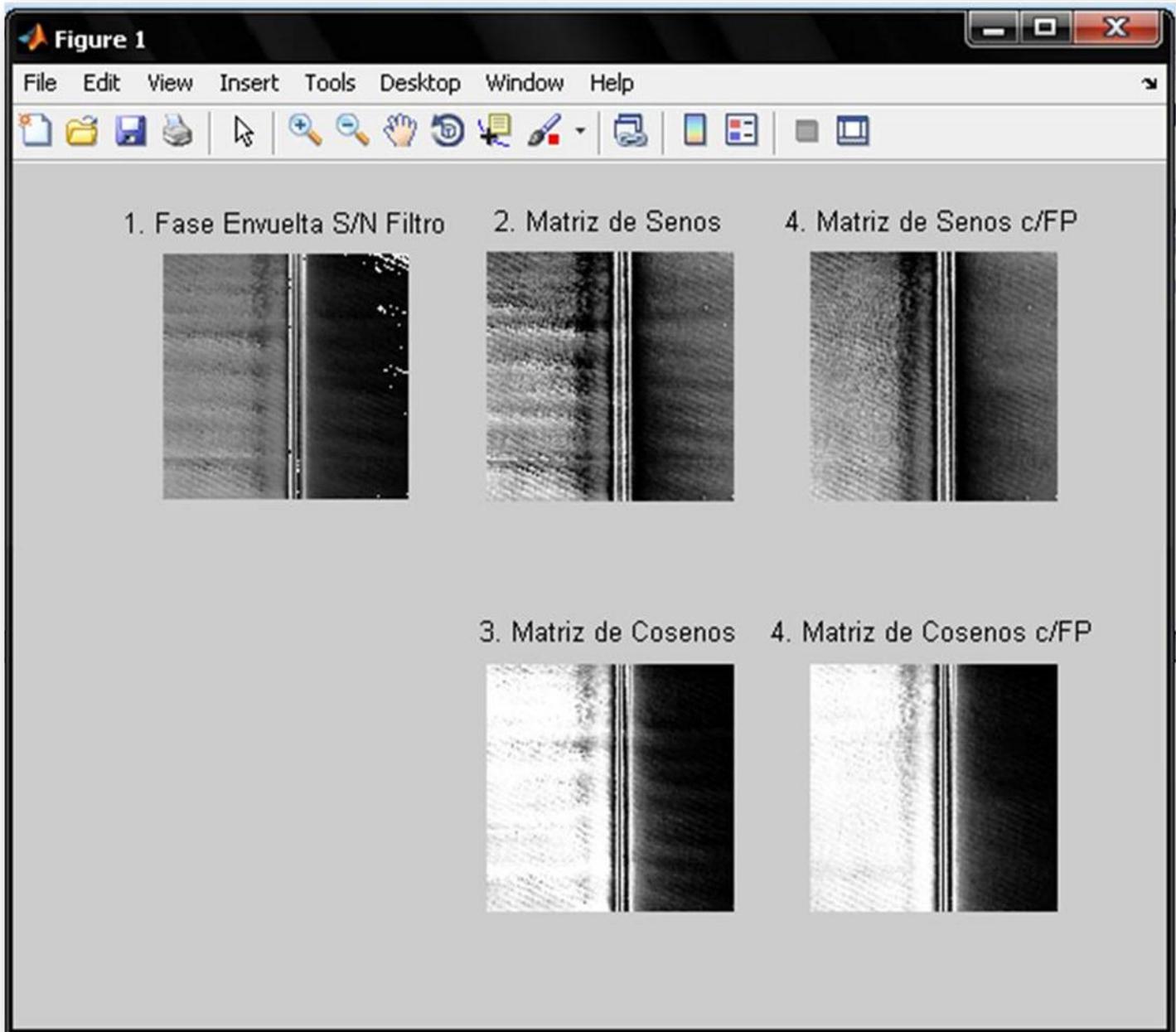


Figura 5.2.2.- Visualizador de figuras de MatLab, donde va presentando una a una las imágenes, empezando por la fase envuelta, luego las matrices seno

y coseno y por último las matrices seno y coseno con Filtro Promediador de (3X1).

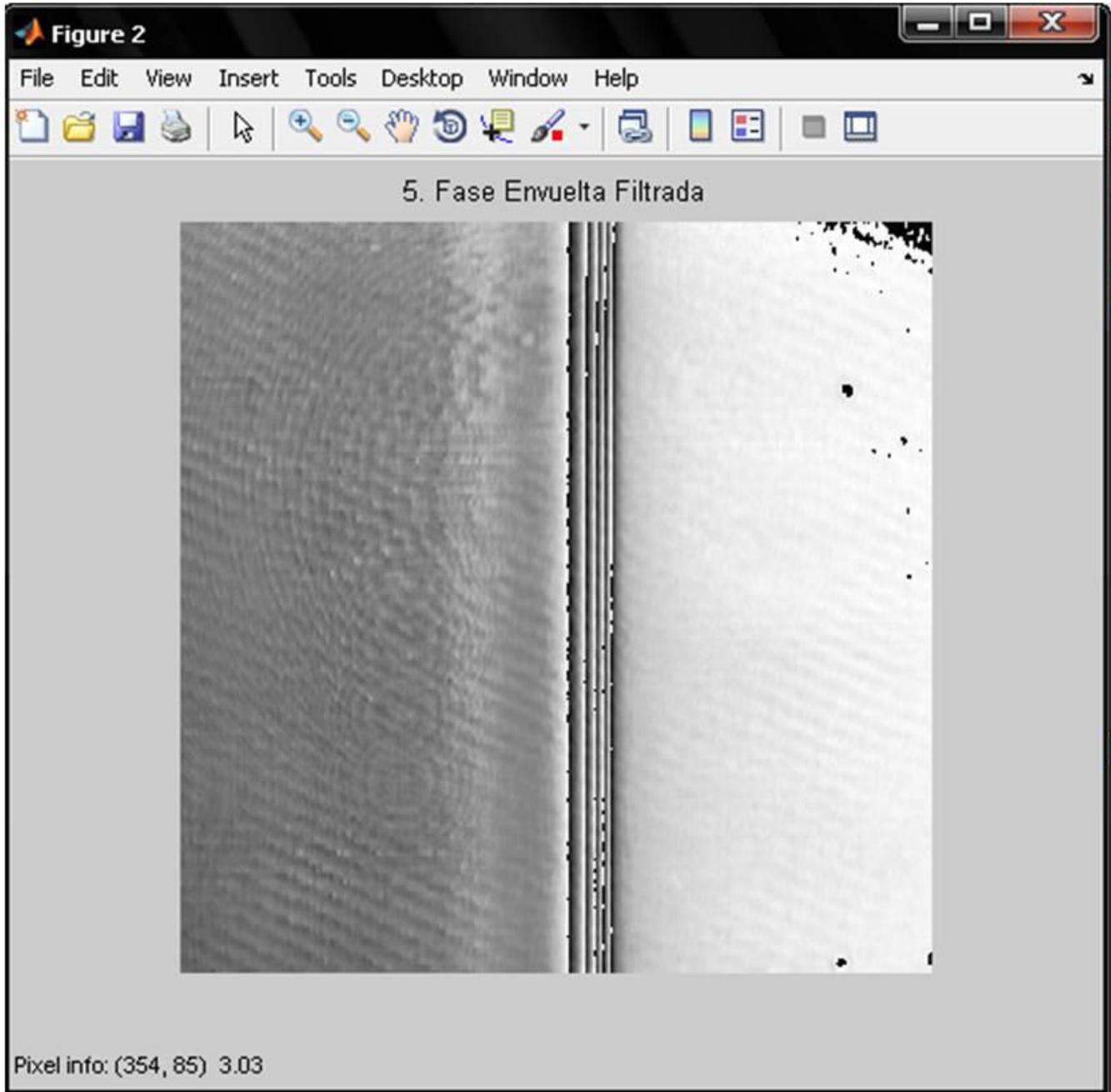


Figura 5.2.3.- Visualizador de figuras de MatLab, en donde se muestra la fase envuelta Filtrada. Nótese la diferencia entre la imagen 1 de la figura

5.2.2 y esta nueva imagen más regular y con menos cambios de tonalidades.

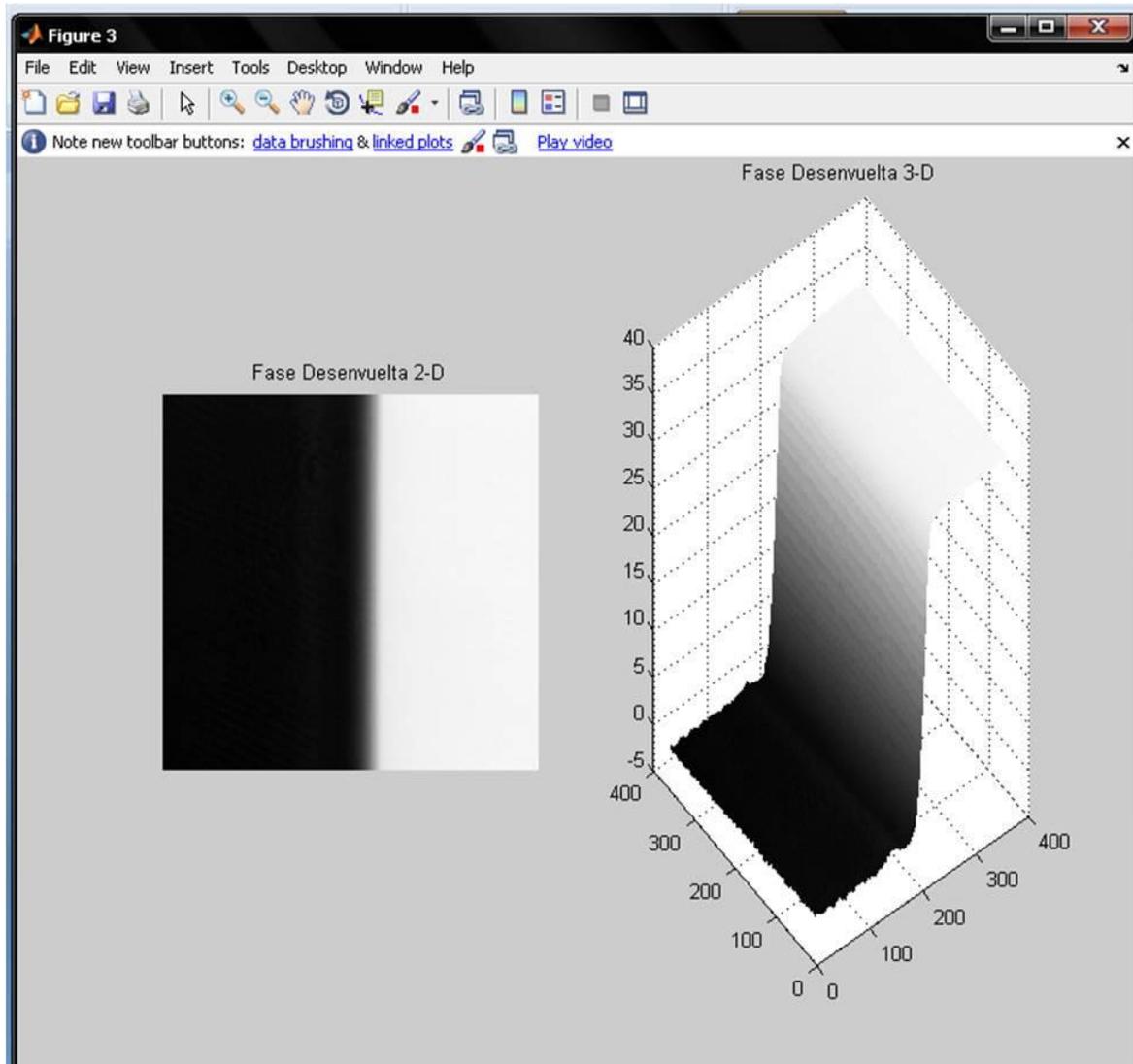


Figura 5.2.4.- Visualizador de figuras de MatLab, en donde se muestra la fase desenvuelta en 2-D y 3-D.

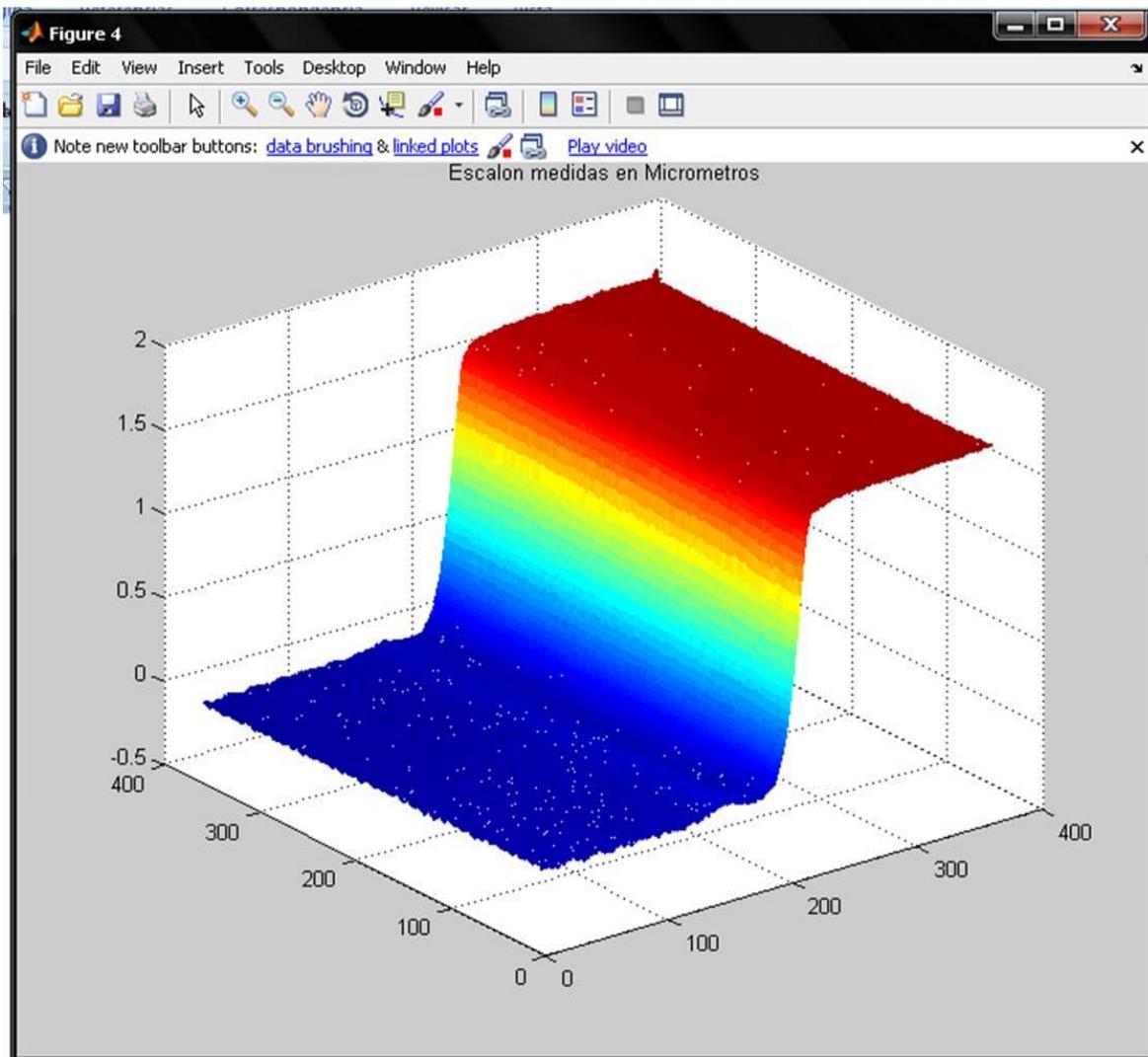


Figura 5.2.5.- Visualizador de figuras de MatLab, en donde se muestra la fase desenvuelta y la escala en micrómetros.

CAPITULO VI

6.1 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La Interferometría es ahora una herramienta indispensable en muchas actividades en las que sea necesario realizar mediciones. A partir de 1947 se han extendido estas técnicas a las ondas de radio, iniciándose así la radiointerferometría astronómica.

En el mundo existen muchos lugares que se dedican a aplicar y estudiar la Interferometría pero, en México es poco el auge que ha tenido este tema, sería muy importante explotar los beneficios que esta técnica puede ofrecernos para facilitar y/o mejorar algunos procesos existentes.

La Interferometría tiene muchísimas aplicaciones muy interesantes desde Medición de distancias, Medición de índices de refracción, Medición de la longitud de onda de la luz, Determinación de campos de Esfuerzos, y en diferentes ramas de Ingeniería, en Astronomía, Medicina, Antropología, etc.

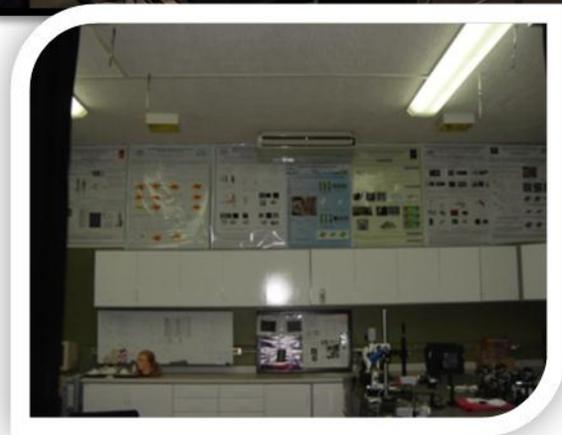
Este es un trabajo de mucha precisión, considerablemente fino y de mucha sensibilidad, por eso se usa para medir pequeños desplazamientos, por lo cual hay que tener mucho cuidado en la construcción del arreglo y en el ambiente en el que se realiza el trabajo, este se puede ver afectado con movimientos provocados por los pasos, por sonidos que pueden ser hasta con el habla, cambios de temperatura; los resultados pueden verse afectados también por contaminación, ya sea suciedad existente a los alrededores, como es el caso del polvo, pelusas, etc., que puedan incrustarse en la óptica del arreglo e inclusive por manchas de huellas digitales que se pudiesen dejar en el armado del arreglo.

Es muy importante recalcar que por ser una prueba no destructiva el uso de la Interferometría, es de mucha importancia, ya que no necesitamos de sobre esforzar o afectar las muestras utilizadas hasta el grado de ser inservibles para estudiar y/o predecir su comportamiento, ya que pueden ser objetos muy delicados, costosos y hasta únicos.

ANEXOS

ANEXO 1 FOTOS DEL CENTRO DE INVESTIGACIONES EN
ÓPTICA Y DEL ÁREA DE TRABAJO (LABORATORIO
"METROLOGÍA II")





ANEXO 2 MATERIAL UTILIZADO Y CARACTERÍSTICAS

Material	Características	Imagen
Atenuador	Disminuye la cantidad de luz al atravesarlo	
Cámaras CCD	Resolución: 640X480 pixeles	
Colimador de Haz de luz	Permite que el haz que lo atraviesa de luz	
Controlador de Piezoeléctrico de canal simple	Manda corriente eléctrica a los Actuadores piezoeléctricos, es controlado por la PC o Manual	

**Cubo divisor de
Haz 50x50**

Deja pasar un cantidad de luz y
Refleja otra parte de ella



Diafragma

Obstruye o no el paso del haz de
luz, utilizado para alinear el
sistema



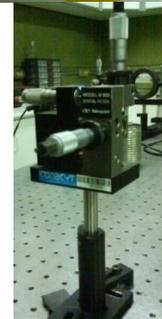
Escalones

Películas delgadas de Aluminio



Filtro Espacial

Permite ampliar y dejar pasar una
parte del haz de luz del laser



Láser

Helio-Neón
 $\lambda=633$ nanómetros



**Monturas
Mecánicas**

Para fijar y colocar a alturas necesarios los instrumentos a utilizar



**Objetivo
interferométrico**

Aumenta el área de iluminación del laser



**Objetivo de
Microscopio
Interferencial tipo
Michelson**

Resolución: 2.5x y 5x
Marca Nikon



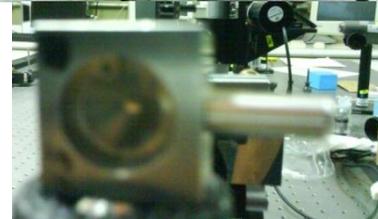
Piezoeléctrico

Por medio de cambios de voltajes sus moléculas se reacomodan y cambian su tamaño



Pinhole

Permite el paso a una parte del haz de luz que lo atraviesa del tamaño de 25 micrómetros



Proyector

Proporciona luz blanca



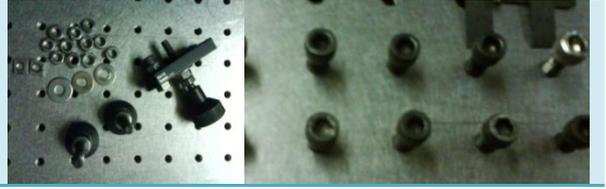
PC

Realizar la adquisición de datos
Requeridos



Tornillos,
Tuercas,
Rondanas, cuñas,
etc.

Sujeción de los instrumentos a
utilizar a la mesa hidráulica



REFERENCIAS

- (1) Hecht E., Zajac A., *ÓPTICA*, Addison Wesley Longman (1998)
- (2) Max Born, Emil Wolf (1991). *Principles of Optics*. Pergamon Press
- (3) KJELL J. GASVIK , "OPTICAL METROLOGY" 3RD EDITION.
- (4) F. Sears, M. Zemansky, H. Young y R. Freedman, *Física universitaria, vol. I y II* (Adison-Wesley Longman, México, 1999).
- (5) M. Alonso y E.J. Finn, *Física, vol. II, Campos y Ondas y vol. III, Fundamentos Cuánticos y estadísticos* (Fondo Educativo Interamericano; ed. inglesa, Addison-Wesley, Reading, Mass., 1967).
- (6) Sears Fundamentos de Física III, ÓPTICA, Aguilar ediciones.
- (7) <http://www.microscopyu.com/articles/interferometry/twobeam.html>
- (8) Digital Image Processing Using Matlab/Rafael C. Gonzalez, Richard E. Woods, Steven L. Eddins
- (9) González & Woods. *Tratamiento digital de imágenes*. Addison-Wesley 1996 ISBN: 2-201-62576-8.
- (10) Amthauer E. *Apuntes de clase*.
- (11) Matlab 6.5. *Image Processing Toolbox*.