



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

Generación y Caracterización de Pantallas de Fase en Laboratorio

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES
P R E S E N T A :
ITANDEHUI GRIS SÁNCHEZ



DIRECTOR DE TESIS:
DR. LEONARDO SÁNCHEZ PENICHE

2006



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS	VII
INTRODUCCIÓN	IX
CAPÍTULO 1 CONTEXTO	1
1.1 EFECTOS DE LA TURBULENCIA ATMOSFÉRICA EN LAS IMÁGENES ASTRONÓMICAS	1
1.2 TURBULENCIA ÓPTICA EN LA ATMÓSFERA	2
1.2.1 CONSTANTE DE ESTRUCTURA DEL ÍNDICE DE REFRACCIÓN	2
1.3 ÓPTICA ADAPTATIVA (OA)	6
1.4 ÓPTICA ADAPTATIVA E INSTRUMENTACIÓN EN EL IA-UNAM	10
1.4.1 GUIELOA	10
1.4.2 SCIDAR GENERALIZADO MEXICANO (SCIDARGM).	14
1.5 NECESIDAD DE UN SIMULADOR DE TURBULENCIA ATMOSFÉRICA	15
CAPÍTULO 2 ALTERNATIVAS PARA LA SIMULACIÓN DE TURBULENCIA ÓPTICA	17
2.1 CLASIFICACIÓN DE SIMULADORES DE TURBULENCIA ÓPTICA	17
2.2 DISPOSITIVOS QUE SIMULAN LA TURBULENCIA ÓPTICA	18
2.2.1 ESPEJOS DEFORMABLES	18
2.2.2 DISPOSITIVOS DE CRISTAL LÍQUIDO	24
2.2.3 GENERADORES DE TURBULENCIA POR MEDIO DE MEZCLA DE FLUIDOS	24
2.2.4 PLACAS DE TRANSMISIÓN ESTÁTICAS O PANTALLAS DE FASE	24
2.3 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LAS ALTERNATIVAS PARA SIMULAR LA TURBULENCIA ÓPTICA	28
2.4 PANTALLAS DE FASE DE MATERIAL ACRÍLICO TRANSPARENTE: TÉCNICA ELEGIDA PARA SIMULAR LA TURBULENCIA ÓPTICA EN EL IA-UNAM	28
CAPÍTULO 3 SIMULACIÓN NUMÉRICA DE MAPAS DE FASE Y DE MAPAS DE AMPLITUD	31
3.1 SIMULACIÓN NUMÉRICA DE MAPAS DE FASE Y DE AMPLITUD POR MEDIO DE TURBULENZ	32

3.1.1 PRINCIPIO DEL ALGORITMO DE CORRECCIÓN DEL ENROLLAMIENTO DE FASE	34
3.1.2 IMÁGENES OBTENIDAS PARA EL TELESCOPIO DE 2.1 M DEL OAN-SPM	36
3.1.3 AJUSTE GAUSSIANO PARA EL CÁLCULO DEL ANCHO A MEDIA ALTURA (FWHM)	38
3.2 GENERACIÓN NUMÉRICA DE PANTALLAS DE FASE Y DE AMPLITUD POR MEDIO DE UN FACTOR DE ESCALA	42
CAPÍTULO 4 GENERACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE PANTALLAS DE FASE EN LABORATORIO	45
4.1 GENERACIÓN DE PANTALLAS DE FASE EN LABORATORIO	45
4.1.1 GENERACIÓN DE PANTALLAS DE FASE CON MÚLTIPLES CAPAS DE ACRILATOS	46
4.1.2 GENERACIÓN DE PANTALLAS DE FASE CON MATERIAL ACRÍLICO	49
4.2 CARACTERIZACIÓN DE PANTALLAS DE FASE EN LABORATORIO	50
4.2.1 MONTAJE ÓPTICO	50
4.2.2 MEDICIONES DE PANTALLAS DE FASE EN LABORATORIO	52
4.2.3 USO DE RUTINAS EN IDL PARA LA CARACTERIZACIÓN	60
CONCLUSIONES	73
APÉNDICE A DESCRIPCIÓN DE LAS PRINCIPALES RUTINAS PROGRAMADAS EN IDL	75
APÉNDICE B APROCEDIMIENTOS PARA LA GENERACIÓN Y MEDICIÓN DE PANTALLAS DE FASE EN LABORATORIO	79
B.1 PROCEDIMIENTO PARA LA GENERACIÓN DE PANTALLAS DE FASE EN LABORATORIO	79
B.2 PROCEDIMIENTO PARA LA MEDICIÓN DE PANTALLAS DE FASE EN LABORATORIO	80
APÉNDICE C DESCRIPCIÓN DEL INTERFERÓMETRO ZYGO	83
C.1 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DEL INTERFERÓMETRO ZYGO	84
C.2 ESPECIFICACIONES DEL INTERFERÓMETRO ZYGO SISTEMA GPI XP, GPI XPHR, GPI HS	87

INTRODUCCIÓN

El pensamiento filosófico, como el científico y el tecnológico son pilares del mundo actual, y han ayudado en gran medida a resolver las diversas interrogantes que la humanidad se ha planteado desde que se tiene registro. Las respuestas encontradas se han plasmado a través de las artes, la ciencia o la filosofía entre muchas otras posibilidades y el conocimiento adquirido ha trascendido épocas y fronteras.

Para el hombre, además de la Filosofía, sin duda la Ciencia ha sido al mismo tiempo la motivación y la herramienta intelectual para explicar cuestiones tan intrincadas como explicar la propia existencia, la de la vida en la Tierra o la naturaleza y origen del universo en el que habita. Preguntas a las que se ha dado respuesta aunque parcial, valiéndose por supuesto de la tecnología para materializar las ideas y llevar a cabo proyectos. Es necesario situar a la tecnología en su justa dimensión, labor que está en manos de la ética profesional de los científicos e ingenieros. Esta ha cumplido una labor fundamental dentro de la sociedad y es por ello que debemos estar atentos a los efectos tanto positivos como negativos.

Desde esta perspectiva la Astronomía, como ciencia, involucra el interés colectivo de explicar y entender el cosmos y también el interés por crear soluciones tecnológicas que permitan profundizar en el estudio del Universo. La Astronomía ha impulsado el desarrollo tecnológico. Ya en el mundo actual son incontables los beneficios directos para la sociedad heredados por esta fascinante área. Desde luego es obligatorio puntualizar que la transformación útil y optimizada de los recursos junto con el ingenio y la creatividad apuntan en una dirección, la Ingeniería.

Dentro de la Astronomía además de los campos directamente relacionados con el estudio del Universo, existe otro campo de sumo interés, dicho campo es el relacionado con la instrumentación y el cómputo aplicado. La necesidad de innovación tecnológica dentro de la Astronomía para su mejor desarrollo ha comprometido a la Ingeniería como disciplina y a sus diversas ramas a desarrollar instrumentos sofisticados que resuelvan y satisfagan la exigencia de la tarea astronómica, con el propósito de ampliar y mejorar el conocimiento del cosmos.

La relación existente entre la Astronomía y la Ingeniería es muy estrecha, debido a que los instrumentos necesarios para el estudio de la primera los proporciona la segunda; el ejemplo más claro es el telescopio. Actualmente se desarrollan instrumentos que mejoran la calidad de las imágenes obtenidas con la luz que ha viajado durante mucho tiempo y a través de enormes distancias.

El Instituto de Astronomía de la Universidad Nacional Autónoma de México (IA-UNAM) no es la excepción respecto al desarrollo e innovación tecnológica. Actualmente existen varios proyectos institucionales para el desarrollo e

implementación de instrumentación aplicada a la astronomía que muy posiblemente también sea útil para otras áreas.

Mi trabajo de tesis consistió en iniciar el desarrollo de un simulador de turbulencia atmosférica en laboratorio. El objetivo concreto de este trabajo fue el estudio, fabricación y caracterización de pantallas de fase para ser utilizadas posteriormente en el montaje opto-mecánico del simulador de turbulencia. Durante este trabajo se buscó el uso de materiales comunes (sustratos transparentes: vidrio y/o acrílico) para mantener un bajo costo en el proyecto.

Las pantallas de fase fabricadas y caracterizadas por nosotros, se utilizarán en el simulador de turbulencia atmosférica que servirá para calibrar instrumentos que actualmente se encuentran en desarrollo y fabricación en el IA-UNAM y que en una etapa posterior se montarán en los telescopios del Observatorio Astronómico Nacional de San Pedro Mártir (OAN-SPM).

Como parte preliminar del trabajo, en el Capítulo 1 se plantea un contexto en el que se describe de manera general la física de la turbulencia atmosférica y sus efectos en la Astronomía Observacional. Del mismo modo se refiere la idea de la instrumentación que se realiza en el IA-UNAM, enfocada al estudio de la turbulencia óptica y a mejorar la resolución angular de los telescopios (Óptica Adaptativa.)

El criterio utilizado para elegir una alternativa para la generación de las pantallas de fase en laboratorio está definido por las necesidades astronómicas y principalmente relacionado con los recursos tecnológicos y económicos disponibles. En el Capítulo 2 se abordan las distintas alternativas para la generación de turbulencia óptica. Se muestran las ventajas y desventajas de cada técnica.

En el Capítulo 3 se detallan los procesos necesarios para la generación numérica de las pantallas de fase mediante simulaciones de cómputo, útil y necesaria para el desarrollo confiable del proyecto.

El Capítulo 4 refiere el método utilizado para fabricar las pantallas de fase y las mediciones registradas, así como el análisis de las mediciones realizadas en el interferómetro ZYGO GPI-HS. Las conclusiones del trabajo se presentan en el Capítulo 5.

La descripción de las rutinas de programación en IDL utilizadas para caracterizar las pantallas de fase se incluye en el Apéndice A. En el Apéndice B se describen los protocolos de generación y medición de las pantallas de fase. En el apéndice C se detalla la información técnica del interferómetro utilizado.

CAPÍTULO 1 CONTEXTO

1.1 EFECTOS DE LA TURBULENCIA ATMOSFÉRICA EN LAS IMÁGENES ASTRONÓMICAS

La calidad de las imágenes astronómicas obtenidas en la Tierra está limitada por la atmósfera y por factores tecnológicos. La atmósfera terrestre está compuesta de diferentes elementos gaseosos transparentes para la luz en la región óptica del espectro (de 400nm a 700nm). Sin embargo en ella, existen fenómenos de absorción y refracción de la luz que manifiestan sus efectos en el deterioro de la calidad de las imágenes astronómicas.

El *límite de difracción* se utiliza como parámetro para establecer la resolución máxima de un telescopio (es decir, la mejor calidad de imagen que puede dar un telescopio). Usualmente se mide como un ángulo que depende del tamaño de la apertura, entiéndase como el tamaño del espejo primario del telescopio (o de la pupila de entrada) y de la longitud de onda a la que se observa. Esta dependencia se muestra en la ecuación (1.1). El límite de difracción es la resolución angular para una longitud de onda λ sobre un diámetro D dado por el ancho a media altura (FWHM) de la llamada figura de Airy,

$$R_D \approx \frac{\lambda}{D}. \quad (1.1)$$

Además del límite de difracción y las aberraciones introducidas por el propio telescopio hoy en día se conoce otra limitante en la resolución de imágenes astronómicas y es la perturbación que produce la turbulencia atmosférica en la propagación de la luz que pasa a través de atmósfera. La turbulencia atmosférica es un fenómeno producido en general por los cambios de presión y temperatura. El índice de refracción no es constante en toda la masa de aire por la que pasa la luz como resultado de las variaciones de temperatura y de concentración de vapor de agua. Para imágenes de largo tiempo de exposición (varias decenas de segundos o minutos) la intensidad de una fuente puntual que se observa en el plano imagen de un telescopio tiene un tamaño angular proporcional a λ/r_0 , donde r_0 es un símil de D de acuerdo con la turbulencia óptica que se produce en la atmósfera. λ/r_0 se conoce como *seeing* astronómico y brinda una idea de las características de observación del sitio astronómico, así

$$R_{seeing} = \frac{\lambda}{r_0}. \quad (1.2)$$

La luz es una onda electromagnética (OEM). Se representa como una onda compleja con amplitud A y fase ϕ , es decir un frente de onda de superficie constante. Caso análogo al del campo eléctrico que tiene la forma $U=Ae^{i\phi}$.

La luz proveniente de un objeto al atravesar la atmósfera, viaja por distintos caminos ópticos produciéndose una distorsión en el frente de onda. Los efectos que producen las fluctuaciones de temperatura se observan en distorsiones para longitudes de onda ópticas, mientras que para las longitudes de onda milimétricas la variación en la concentración de vapor de agua es de mayor efecto. El frente de onda de una fuente luminosa externa y lo suficientemente lejos de la Tierra, antes de pasar por la atmósfera es plano, pero al pasar por ella se deforma, se “arruga”. A consecuencia de lo anterior la iluminación en el plano pupila no es uniforme^[22].

1.2 TURBULENCIA ÓPTICA EN LA ATMÓSFERA

En la región óptica del espectro electromagnético el aire tiene un índice de refracción cercano a 1.0, que es muy cercano al del vacío. El índice de refracción depende de la longitud de onda de la OEM que lo atraviesa y también de la temperatura, presión y densidad del material por el cual atraviesa la luz.

En la atmósfera terrestre el índice de refracción no es uniforme debido a los cambios internos de presión, temperatura y concentración de vapor de agua que existen en los estratos que constituyen la estructura vertical de la atmósfera. Ahí se producen fluctuaciones turbulentas en el índice de refracción del aire (turbulencia óptica) que ocasionan perturbaciones en la OEM emitida por un cuerpo celeste.

La turbulencia atmosférica puede causar efectos de dispersión y refracción del haz, hacer borrosa una imagen, causar efecto de motas o speckles en la imagen, y hacer variar la intensidad del haz en el plano focal. Por lo tanto la luz entrante que atraviesa distintos índices de refracción se verá distorsionada cuando llegue al observador en la Tierra, es decir, la imagen será poco nítida, y se moverá de manera pseudos-aleatoria.

1.2.1 Constante de Estructura del índice de refracción

La teoría del aire turbulento o cualquier otro fluido se basa en comprender como se origina el proceso de mezcla. Es posible comparar el índice de refracción en un

punto de la atmósfera $n_1(r_1)$ con el índice de otro punto cercano $n_1(r+r_1)$. La función de covarianza espacial del índice de refracción se define como:

$$B_n(r) = \langle n_1(r+r_1) n_1(r_1) \rangle, \quad (1.3)$$

donde r_1 es la posición en el espacio, r es la separación entre los puntos y $\langle \rangle$ es un promedio de ensamble. La transformada de Fourier de la covarianza -ecuación (1.4) - es la densidad espectral de potencias de las fluctuaciones de n :

$$\Phi(K) = \frac{1}{(2\pi)^3} \int B_n(r) e^{-K \cdot r} d^3r. \quad (1.4)$$

Donde K representa la frecuencia espacial.

La propuesta de Kolmogorov es válida para escalas entre la escala externa L_0 , en la que se inyecta energía, y la escala interna donde las fluctuaciones turbulentas se disipan en calor por la viscosidad. Kolmogorov desarrolló el llamado *Espectro de Kolmogorov* -ecuación (1.5)-, con argumentos puramente dimensionales:

$$\Phi(K) = 0.033 C_n^2 K^{-11/3}. \quad (1.5)$$

Von Karman logró resolver la integral introduciendo una forma funcional con escala externa finita. El llamado *Espectro de Von Karman* es de la forma que se presenta en la ecuación (1.6):

$$\Phi(K) = 3.9 \times 10^5 C_n^2 L_0^{-11/3} \left(1 + \frac{L_0^2 K^2}{(2\pi)^2} \right)^{-11/6}. \quad (1.6)$$

Ambos modelos y la mayoría de estudios que se relacionen con la turbulencia atmosférica, hacen uso de la constante C_n^2 que aparece en las últimas dos ecuaciones. La constante de estructura C_n^2 es una medida de la intensidad de la turbulencia; si el valor de dicha constante es alto, la turbulencia es fuerte. Las unidades de C_n^2 son metros a la potencia $-2/3$.

En condiciones atmosféricas normales El intervalo de valores para C_n^2 se encuentra entre $10^{-18} \text{ m}^{-2/3}$ y $10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$. Hay que notar que la constante de estructura cambia con el tiempo (durante una noche de observación). Para altitudes mayores a 30 km, la presión del aire es tan baja que las fluctuaciones de temperatura no

afectan al índice de refracción. Por lo tanto a esas alturas el valor del C_n^2 es típicamente menor que $10^{-18} \text{m}^{-2/3}$.

Cabe señalar que la turbulencia óptica se desarrolla en capas de espesor del orden de 10m, lo cual implica que C_n^2 varía abruptamente con la altura. Los perfiles de C_n^2 , o sea $C_n^2(h)$ dependen fuertemente del sitio donde se midan.

1.2.2 Longitud de Coherencia de Fried (r_0)

Para explicar los efectos de la turbulencia atmosférica se puede hacer una analogía entre ésta y un conjunto de lentes flotando en la atmósfera, moviéndose unos alrededor de otros y fundiéndose unos con otros de manera aleatoria. Eso es lo que sucede con los flujos también conocidos como corrientes o capas atmosféricas que se encuentran en constante cambio, crecen, disminuyen, y se mueven aleatoriamente. Forman grandes bloques que desplazan las imágenes que se encuentran a su paso, mientras que otras se rompen en pequeños pedazos haciendo borroso al objeto^[22,23].

En 1966, David Fried^[8] calculó el efecto de todas estas pequeñas lentes flotantes. Dicho efecto reduce la coherencia del haz. Esto es, la luz viaja en varios caminos a través de varias lentes atmosféricas desde la fuente hasta el detector. Si el camino que recorre una parte de la onda es diferente al camino que recorre otra parte de la misma onda, ésta ya no es coherente. Si la apertura a través de la cual se observa la fuente de luz es tan pequeña que no capta o reúne luz proveniente de distintos caminos ópticos a través de la atmósfera, es posible mantener la coherencia de la onda luminosa todo el camino desde la fuente hasta el detector. Fried determinó que existe una longitud característica, llamada longitud de coherencia, que es el tamaño máximo que tendría una apertura que conservara la coherencia de la OEM. Cualquier tamaño de apertura mayor al tamaño límite, se verá reflejado en una mayor distorsión y menor coherencia de la luz. La longitud de coherencia r_0 también se conoce como parámetro de Fried, o tamaño de celda coherente.

Para una onda plana y asumiendo que la turbulencia óptica es de tipo Kolmogorov, la longitud de coherencia esta dada por la ecuación (1.7):

$$r_0(\lambda) = \left[0.423 \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 \int_0^L dz C_n^2(h) \right]^{-3/5}, \quad (1.7)$$

donde L es la longitud total del camino de propagación y λ es la longitud de onda que se observa. El exponente (-3/5) aparece por que se supone turbulencia con una estadística de Kolmogorov. El parámetro de Fried r_0 está en unidades de longitud.

Frecuentemente se calcula la longitud de coherencia r_0 para una línea de visión a través de la atmósfera desde la Tierra. La constante de estructura C_n^2 varía con la altura h . Si en vez de apuntar directamente al cenit se apunta a una dirección con cierta inclinación, el camino o el recorrido se alarga. El ángulo β medido a partir del cenit es el ángulo entre la dirección a la que se apunta y la normal al suelo y es factor para un cálculo completo de r_0 . Siendo la longitud de coherencia:

$$r_0(\lambda) = \left[0.423 \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 \sec \beta \int_0^L dz C_n^2(h) \right]^{-3/5} \quad (1.8)$$

El parámetro de Fried se usa ampliamente para describir el grado de turbulencia en un sitio determinado. El valor varía desde unos cuantos metros en condiciones muy buenas de observación en el infrarrojo (~ 2 micras), hasta algunos centímetros en malas condiciones de observación a longitudes de onda visibles (~ 0.5 micras).

De las relaciones anteriores se encuentra que $r_0 \propto \lambda^{6/5}$. Por lo tanto el tamaño límite de la apertura de coherencia a las longitudes de onda del infrarrojo puede ser de 2 a 10 veces la apertura a longitudes de onda visibles.

De la ecuación (1.8) se observa que la energía proveniente de la turbulencia dada por la integral del C_n^2 se suma para cada capa. En general, la atmósfera presenta sólo unas cuantas capas que contribuyen sustancialmente a la turbulencia óptica.

El cálculo del diámetro de Fried (r_0) para 2 capas turbulentas cuyo r_0 sea conocido estaría dado por la suma pesada por los coeficientes apropiados:

$$r_0 = \left[(r_0)_1^{-5/3} + (r_0)_2^{-5/3} \right]^{-3/5}, \quad (1.9)$$

ya que lo que se suma linealmente es el C_n^2 .

La máxima resolución angular está dada por el límite de difracción. En el caso del espejo primario de un telescopio de diámetro $D = 2\text{m}$ y una longitud de onda $\lambda = 0.5\mu\text{m}$ el límite de difracción es:

$$R_D \quad \frac{\lambda}{D} = \frac{0.5\mu\text{m}}{2.1\text{m}} = 0.05''.$$

Considerando la degradación de resolución de la imagen y un valor típico del diámetro de Fried $r_0 = 10$ cm, para una longitud de onda $\lambda = 0.5\mu\text{m}$ la resolución sería:

$$R_{seeing} = \frac{\lambda}{r_0} = \frac{0.5 \mu m}{10 cm} = 1''.$$

Podemos destacar que la turbulencia atmosférica degrada de manera muy importante la resolución angular, en este caso la degradación es de un factor de 20 .

1.3 ÓPTICA ADAPTATIVA (OA)

La Óptica Adaptativa (OA) es una idea propuesta por Babcock^[2] sumamente útil para la corrección de las deformaciones de fase del frente de onda introducidas por la atmósfera. La tecnología actual permite hacer la detección y corrección del frente de onda proveniente de la luz de objetos de interés que atraviesa medios turbulentos que alteran la fase original. La forma más sencilla de corregir un frente de onda distorsionado es por medio de espejos deformables. Una vez detectada la aberración del frente de onda, la información obtenida se transforma en potencial eléctrico para activar los mecanismos encargados de mover un espejo deformable, contrarrestando la forma del frente de onda aberrado, obteniendo nuevamente un frente de onda plano tal y como era antes de cruzar la atmósfera.

Todos los sistemas de OA generalmente utilizan el principio de fase conjugada. Recordemos que una OEM puede ser descrita como una amplitud A y una componente de fase ϕ . La OA invierte la fase para compensar las distorsiones de la misma. La inversión de fase observada en el exponente del vector de campo eléctrico, es el cambio de signo en el término junto al número imaginario. Esta conjugación matemática corresponde a la conjugación del campo óptico, justamente lo que es necesario para compensar una fase distorsionada^[8].

La calidad de una imagen puede degradarse por las distorsiones que sufre el frente de onda en la fase así como por fluctuaciones de amplitud al pasar a través de la atmósfera y de la instrumentación astronómica. Sin embargo el efecto de las fluctuaciones de fase predomina. Por esta razón el principio de operación y diseño de los sistemas de OA es compensar las fluctuaciones de fase mediante espejos deformables. Dichos dispositivos introducen un desplazamiento φ en la fase para producir una diferencia en el camino óptico δ . El desplazamiento de fase es ^[19]

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \delta. \quad (1.10)$$

La cantidad δ es la variación del camino óptico ne ,

$$\delta = \Delta(ne). \quad (1.11)$$

Donde n y e son el índice de refracción y la geometría de la distribución espacial del camino del corrector respectivamente. Las diferencias geométricas Δe de

camino pueden ser introducidas por medio de la deformación de la superficie del espejo. Las variaciones espaciales del índice Δn se pueden producir con materiales birrefringentes electro-ópticos.

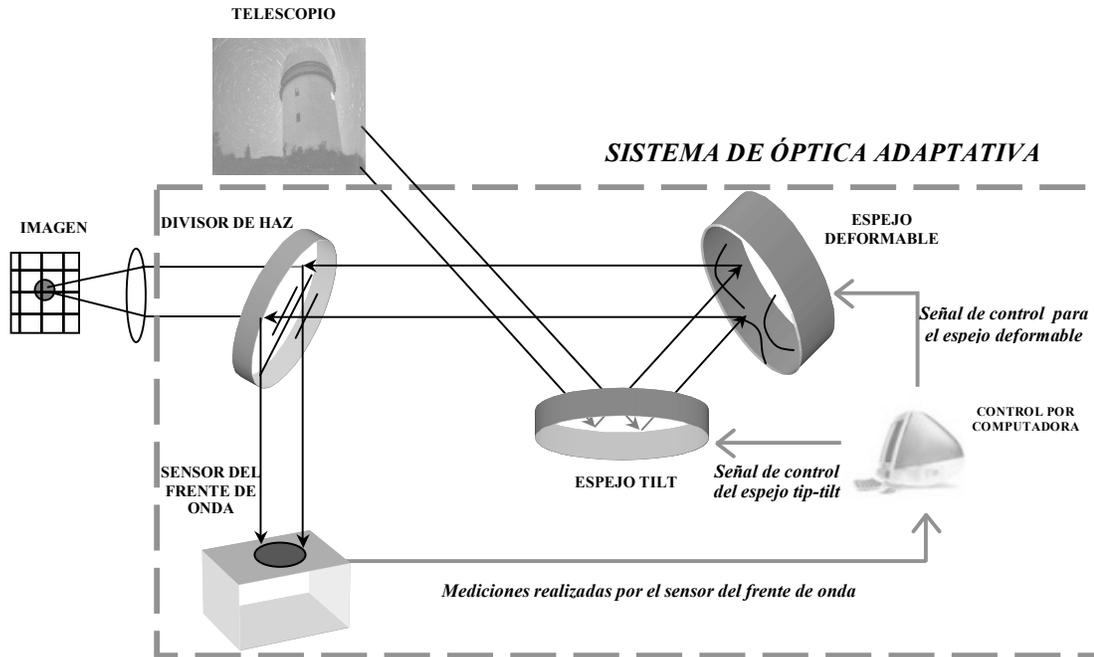


Figura 1.1. Un sistema convencional de Óptica Adaptativa contiene un espejo deformable, un sensor de frente de onda y control por computadora.

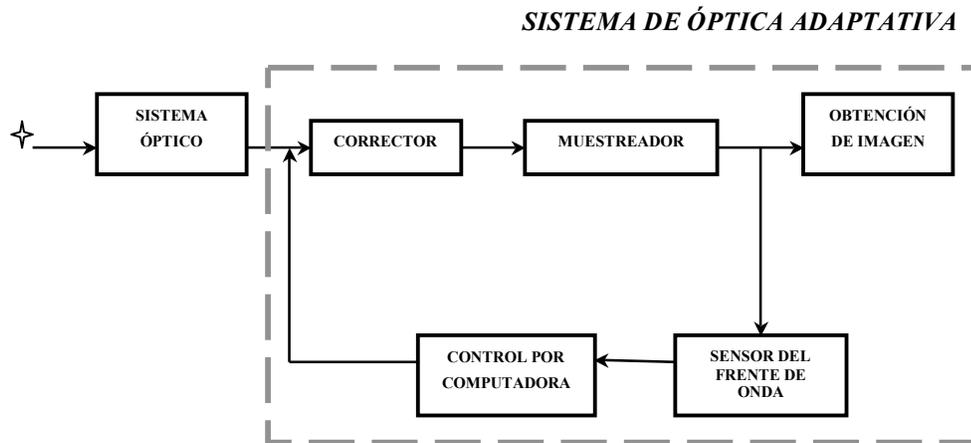


Figura 1.2. Diagrama de bloques de un sistema de Óptica Adaptativa.

Los sistemas de OA inerciales utilizan movimiento mecánico (inercia) de cierto dispositivo para modificar la fase óptica. Los sistemas de OA no inerciales “mueven algo” en una escala molecular, por ejemplo, dentro de cristales, para alterar la fase. A pesar de que el movimiento molecular es verdaderamente inercial, es común referirse a dichos sistemas como no inerciales.

La Figura 1.1 muestra un sistema convencional de OA que contiene los tres principales elementos que son la parte fundamental de todos los sistemas modernos de OA. Estos elementos son el sensor de frente de onda, el espejo deformable y control por computadora. La mayoría de los sistemas utilizados en la práctica contienen varios subsistemas de soporte tal como un divisor de frente de onda, un sistema de control auxiliar para el ajuste del tip/tilt (mostrado como un espejo tilt), y varios otros elementos como el telescopio recolector, la óptica de imagen o *cámara para ciencia* CCD, la óptica de la pupila de trabajo de corrección de imágenes, láseres y transmisión óptica.

Los bloques indispensables que se deben tomar en cuenta para desarrollar un sistema de OA se muestran en la Figura 1.2.

Cierto es que muchos de estos sistemas se utilizan para la adquisición y mejora de imágenes astronómicas. El uso de la OA para compensar sistemas de comunicación (transmisión láser) que operan a través de la atmósfera fue el motor para desarrollar la tecnología. Los tres elementos principales han evolucionado durante los últimos 20 años a dispositivos estándares en la actualidad. El sensor de frente de onda usualmente es una “caja negra” que recibe el rayo de luz y arroja señales eléctricas relacionadas con la fase. El espejo deformable, genéricamente hablando, es un espejo con una serie de actuadores detrás de él que deforman el espejo a la forma especificada. El control por computadora es un procesador de señales que traduce las señales del sensor del frente de onda en instrucciones para el espejo deformable que (conjugan) compensan el haz. Dentro del control por computadora existe un proceso comúnmente llamado “reconstrucción” en el que las señales son utilizadas para reconstruir la fase del haz proveniente de las señales del sensor del frente de onda (WFS por sus siglas en inglés).

Por años la OA ha estado en desarrollo. Desde hace ya algunos años se han obtenido resultados científicos con sistemas de Óptica Adaptativa. Abundan ejemplos al respecto en publicaciones de investigaciones en revistas astronómicas. Se encuentra muchos resultados en páginas en la red de redes (World Wide Web), y varios reportes institucionales y gubernamentales. Se muestran algunos ejemplos de imágenes obtenidas con OA en las figuras 1.3 y 1.4.

La manera en que un sistema de OA trabaja es fundamentalmente simple. La implementación es el verdadero reto. Para un sistema de adquisición de imágenes, como el de un observatorio o un sistema de propagación láser, es necesario medir la fase del haz óptico, determinar que tan distorsionado está, realizar cálculos para la compensación, aplicar la compensación al espejo deformable, volver al inicio y hacerlo todo de nuevo cuando la distorsión de la fase cambie. Un sistema de control

de óptica adaptativa le dará forma al espejo deformable como lo indique la aberración, a excepción del signo que es opuesto. La compensación que brinda un espejo deformable en un sistema ideal, es el complejo conjugado del campo o $U=Ae^{-i\phi}$. Esa es la razón del término conjugación de fase.

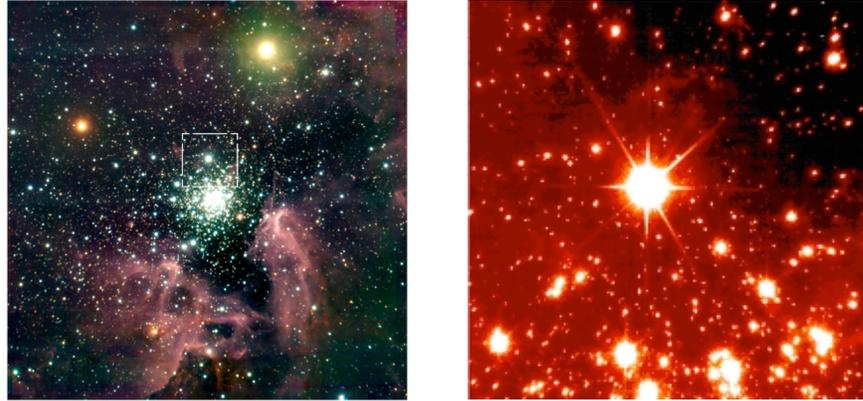


Figura 1.3. Izquierda imagen del objeto NGC3603. Derecha imagen corregida con Óptica Adaptativa.

Dado que este proceso observa una distorsión, aplica la corrección y vuelve a ver el resultado de la corrección, se le llama sistema de “lazo cerrado”. Esto contrasta con un sistema activo de lazo abierto en el que se toma una medida y la corrección se aplica ciegamente. Los sistemas de OA son generalmente de lazo cerrado. En algunas aplicaciones, el “lazo cerrado” se ha convertido en una característica que define a los sistemas de OA. Mientras que los astrónomos se refieren normalmente a un sistema de un gran ancho de banda de lazo cerrado como “Óptica Adaptativa” (>1 kHz) y los de un pequeño ancho de banda (<2 Hz) son llamados sistemas de “Óptica Activa”.

La Óptica Activa se aplica directamente al espejo primario por medio de actuadores (corrige aberraciones residuales, problemas de flexiones mecánicas, distorsiones introducidas por gradientes de temperatura, etc.). La Óptica Adaptativa se utiliza generalmente en espejos deformables terciarios.

Actualmente algunos sistemas de OA ya están en operación en muchos telescopios del mundo construidos con tecnología de vanguardia.

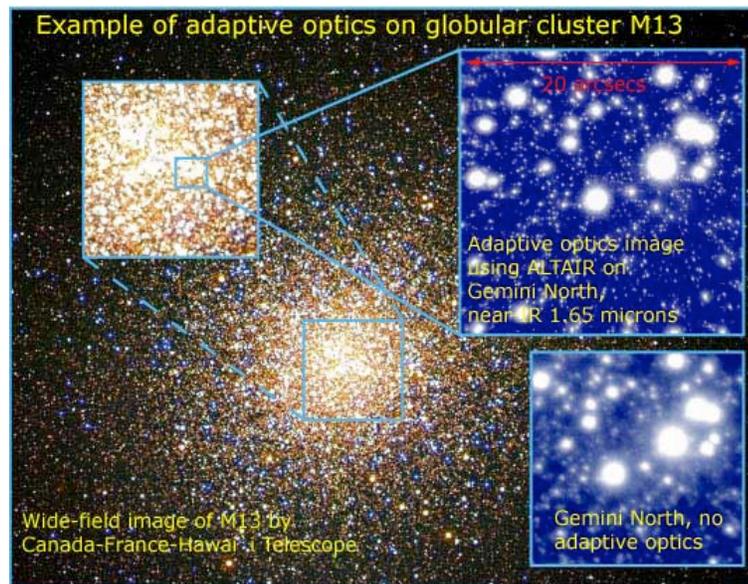


Figura 1.4. Comparación de Imagen del cúmulo M13 visto con OA y sin ella. Izquierda: imagen de gran campo del cúmulo M13. Superior derecha: imagen en azul del cúmulo M13 corregida con OA (Gemini Observatory/AURA).

1.4 ÓPTICA ADAPTATIVA E INSTRUMENTACIÓN EN EL IA-UNAM

En el IA-UNAM actualmente se desarrolla instrumentación cuya misión será mejorar la calidad de las imágenes obtenidas a través de los telescopios.

Por un lado se implementa un instrumento para la Óptica Adaptativa: **Guieloa**. Por otro lado se construye un instrumento para estudios de Óptica Atmosférica, es decir, para el sensado y caracterización de la turbulencia atmosférica: **SCIDARGM**.

1.4.1 Guieloa

En telescopios grandes es frecuente encontrar aberraciones cuasi-estáticas debidas a flexiones de las estructuras mecánicas y a los cambios de temperatura que inducen distorsiones en el espejo primario y secundario. Además de la aberración esférica se produce astigmatismo y coma. Las aberraciones introducidas por el sistema óptico en el haz entrante, degradan la calidad de imagen, que incluso puede llegar a ser peor que la del *seeing*.

Una solución para corregir dichas aberraciones es la Óptica Activa. Consiste en medir las aberraciones en el tren óptico por medio de un sensor de frente de onda y mediante un sistema de control, cambiar las fuerzas en los soportes del espejo

primario para reducir las distorsiones. Se verifica que dichos ajustes sean adecuados, corrigiendo y produciendo mejoras en los ajustes, repitiéndolo algunas veces durante la noche de observación. La meta de la Óptica Activa es alcanzar el límite de *seeing* y corregir aberraciones cuasi-estáticas del telescopio, varias veces durante una noche de observación.

Para compensar las aberraciones introducidas por la atmósfera se utiliza la Óptica Adaptativa. Con esta técnica se mide la luz procedente de una “estrella guía” (natural o láser) usando un sensor de frente de onda. Se corrigen las aberraciones usando un espejo deformable verificando la corrección en un lazo cerrado con una cadencia de 50-1000 Hz (cada 1 a 20 ms). La meta de la Óptica Adaptativa es alcanzar el límite de difracción corrigiendo las aberraciones dinámicas de la atmósfera, además de las aberraciones residuales que puede dejar la Óptica Activa del telescopio.

El proyecto institucional Guieloa es un sistema de Óptica Adaptativa (significa “nuestros ojos” en Zapoteco) para el telescopio de 2.1 metros del OAN/SPM. Actualmente el telescopio de 2.1 m es poco competitivo por su baja calidad de imagen y cambiarlo costaría mucho dinero. Con el uso de la Óptica Adaptativa la resolución angular mejora a un costo mucho menor comparado con la construcción de un telescopio más grande sin OA en el mismo sitio, con el que finalmente se obtendría la misma calidad de imagen (limitada por el “seeing”). En la Figura 1.5 se muestra el esquema del funcionamiento del sistema.

El sistema de OA, se puede considerar como una caja negra entre el telescopio y el instrumento científico. Dicha caja negra que toma el haz de luz proveniente del telescopio con seeing de 1.0''-1.5'' corrigiendo las aberraciones debidas a la atmósfera y al telescopio produciendo imágenes con una resolución entre 0.1'' a 0.2''^[24]. Expande la escala de placa por un factor de 5 para que los instrumentos realicen un muestreo correcto de las imágenes. Funciona en principio con instrumentos que formen imagen directa (CCD) e instrumentos que realicen espectroscopia.

El grado de corrección del sistema de OA esta restringido. La corrección está limitada por errores de retraso en tiempo debidos a que la turbulencia tiene un tiempo de coherencia de 1 a 20 ms. El ruido en el sensor de frente de onda también es un factor limitante en la corrección por lo que es necesario tener una estrella guía con el brillo necesario para determinar los errores de fase. A cambio de una alta resolución angular y mejora de imagen, el campo se reduce debido a que los objetos lejos de la estrella guía pasan por diferentes partes de la atmósfera (anisoplanatismo).

La implementación de este sistema de OA aportará grandes beneficios a programas de investigación que requieran de buena calidad de imagen.

En la Figura 1.6 se observa el montaje del instrumento de OA en el telescopio.

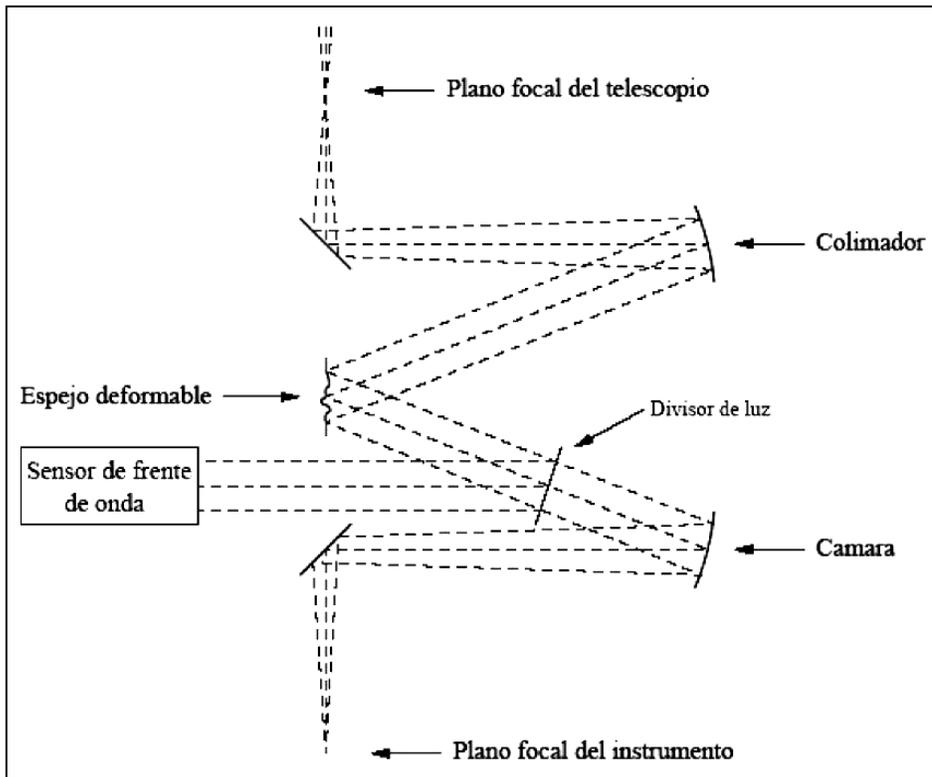


Figura 1.5. Esquema del recorrido del frente de onda en Guieloa.

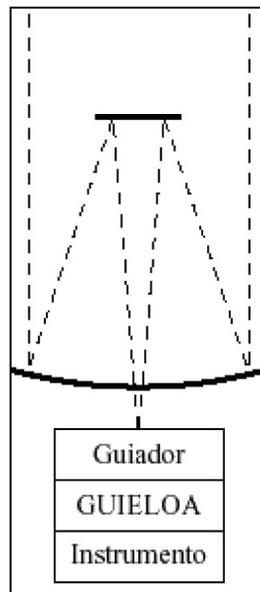


Figura 1.6. Sistema de Óptica Adaptativa Guieloa.

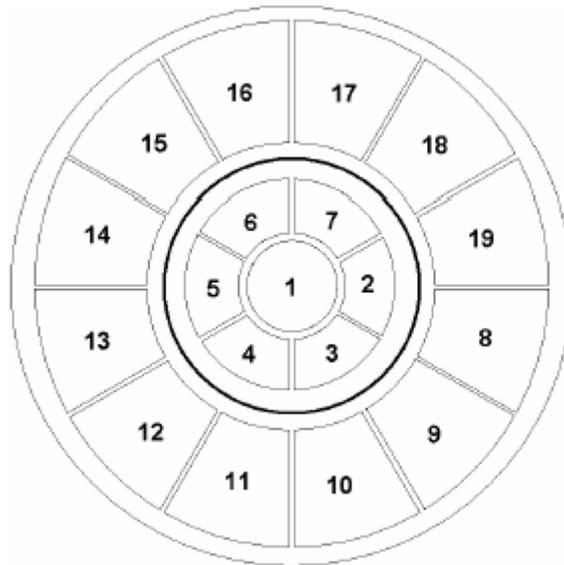


Figura 1.7. Esquema del espejo deformable de Guileo.

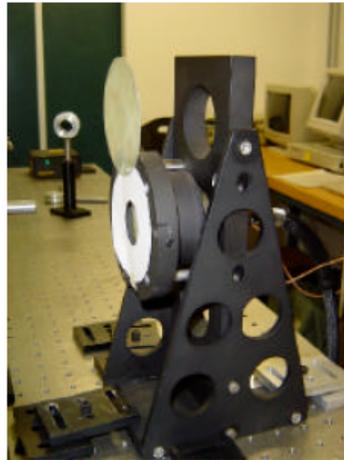


Figura 1.8. Fotografía del espejo deformable de Guileo.

En la Figura 1.7 y Figura 1.8 se muestra el esquema y la fotografía del espejo deformable en el que se forma la imagen de la pupila del telescopio y mediante el cual se corrigen las aberraciones.

1.4.2 SCIDAR Generalizado Mexicano (SCIDARGM).

El SCIDAR (siglas en inglés de Scintillation Detection and Ranging)^[10] es un sistema de detección remota y medición del centelleo producido por la turbulencia atmosférica. Con un procesamiento adecuado de los datos obtenidos por este

instrumento, se determina el perfil vertical de la intensidad de la turbulencia dado por la constante de estructura $C_n^2(h)$. También se pueden determinar perfiles de velocidad del viento $v(h)$. Como sabemos, estos parámetros físicos influyen en la propagación de las ondas electromagnéticas a través de la atmósfera turbulenta. El $C_n^2(h)$ se obtiene a partir de la función de autocorrelación espacial de imágenes del centelleo de una estrella doble (el tiempo de exposición debe ser corto para “congelar” el centelleo). Para determinar $v(h)$ se calcula la intercorrelación espacio-temporal de las imágenes del centelleo.

El SCIDAR clásico detecta el centelleo sobre la pupila del telescopio. La turbulencia en el primer kilómetro de altura es indetectable porque el centelleo producido es muy débil: la varianza del centelleo es proporcional a $h^{5/6}$, donde h es la altura entre el plano de medición y la capa turbulenta (que actúa como pantalla de fase)^[13]. Por lo tanto el SCIDAR Clásico no permite la caracterización de la turbulencia en la capa límite superficial ni en el interior de la cúpula del telescopio.

Para superar esta limitante, se propuso el concepto de SCIDAR Generalizado (SCIDARG)^[9, 10] para detectar el centelleo en un plano virtual localizado algunos kilómetros debajo de la pupila y su implementación fue realizada con éxito^[11].

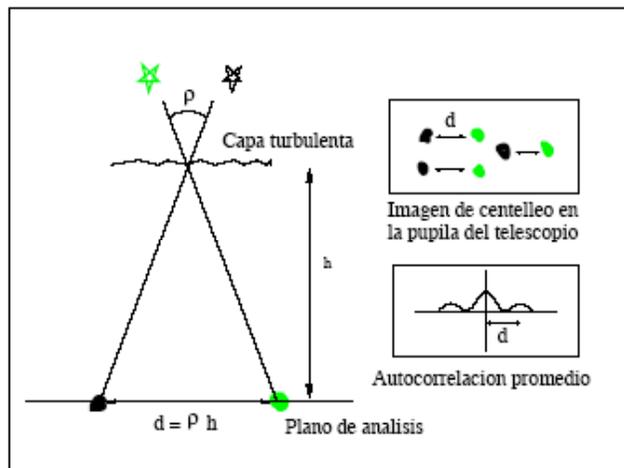


Figura 1.9. Concepto del SCIDAR Clásico.

Las imágenes del centelleo de una estrella doble de separación angular ρ , son detectadas al nivel del suelo en el SCIDAR clásico (Figura 1.9). Una capa turbulenta a una altura h producirá dos distribuciones idénticas separadas por $d = \rho h$. La autocorrelación medida de estas imágenes forma un pico central y dos picos separados del centro una distancia d .

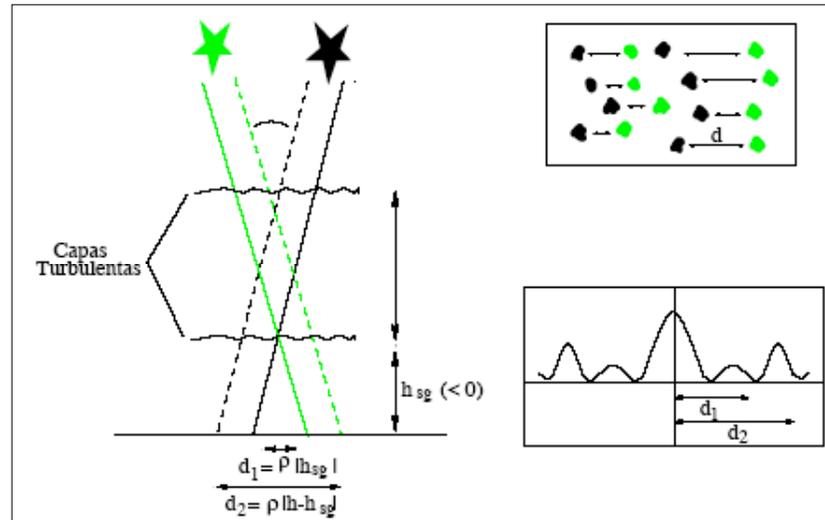


Figura 1.10. Concepto del SCIDAR Generalizado.

En el SCIDARG (Figura 1.10) el plano de análisis de las imágenes está desplazado una altura h_{sg} . Una capa a una altura h y otra a nivel del suelo producirán en la autocorrelación picos separados del centro por distancias d_2 y d_1 respectivamente.

El llamado SCIDARGM se encuentra en una fase avanzada de fabricación en los laboratorios de instrumentación del IA-UNAM.

1.5 NECESIDAD DE UN SIMULADOR DE TURBULENCIA ATMOSFÉRICA

Tanto el proyecto de Óptica Adaptativa Guieloa como el sistema de detección y medición de los perfiles de turbulencia SCIDARGM necesitarán ser calibrados y probados en laboratorio antes de llevarlos al telescopio.

En este contexto, es preciso diseñar y construir un simulador de turbulencia atmosférica para realizar las pruebas en laboratorio, mismo que se utilizará para calibrar los instrumentos mencionados anteriormente.

Este sistema de simulación de turbulencia óptica atmosférica, se basa en introducir deformaciones en el frente de onda mediante pantallas de fase colocadas en el camino óptico de la OEM. La generación de las pantallas de fase bien caracterizadas, será de gran utilidad para calibrar los instrumentos concebidos para mejorar la calidad de imágenes obtenidas a través de los telescopios. La elección de las pantallas de fase como alternativa para la generación de turbulencia óptica se realizó de acuerdo a las necesidades astronómicas y a los recursos tecnológicos y económicos disponibles. Las pantallas de fase pueden ser de utilidad en la calibración de la instrumentación utilizada en diversos campos como el militar o gubernamental, la medicina y las comunicaciones, en los que también se desarrollan sistemas de óptica adaptativa.

CAPÍTULO 2 ALTERNATIVAS PARA LA SIMULACIÓN DE TURBULENCIA ÓPTICA

Como se explicó en el capítulo anterior, la calibración de los instrumentos que se desarrollan en el IA-UNAM es indispensable. Para este fin queremos realizar un simulador de turbulencia para simular el proceso físico a través del cual se produce dicho fenómeno. Necesitamos simular las fluctuaciones en el índice refracción causadas por el movimiento aleatorio de los componentes de la atmósfera y por la variación de los gradientes de temperatura del medio de propagación.

Para el simulador de turbulencia es necesaria una fuente de luz que genere o simule un frente de onda distorsionado, cuyas características sean muy similares a las de la turbulencia atmosférica real y en particular para su comportamiento en las longitudes de onda del óptico.

Existen diversas alternativas para realizar simuladores de turbulencia óptica atmosférica. Es importante subrayar que la diferencia entre cada simulador radica en el método para generar la turbulencia. Usualmente se ocupan arreglos que correspondan a la distribución estadística de la turbulencia óptica de Kolmogorov.

En este capítulo se hará una revisión de las diferentes alternativas para generar turbulencia óptica atmosférica.

2.1 CLASIFICACIÓN DE SIMULADORES DE TURBULENCIA ÓPTICA

Es posible clasificar a los simuladores de turbulencia óptica en dos grandes categorías: los *simuladores de turbulencia que operan en reflexión* y los *simuladores que operan en transmisión*^[7]. También se pueden clasificar a los generadores de turbulencia en *pasivos* y *activos*. La evolución temporal en los

dispositivos activos es intrínseca. Para simular la evolución temporal de la turbulencia atmosférica en los dispositivos pasivos simplemente se giran o se desplazan lateralmente.

Bajo este criterio se incluyen a continuación los diferentes métodos de generación de turbulencia óptica atmosférica en las distintas categorías mencionadas:

- Simulador de turbulencia atmosférica activo operando en reflexión: en estos dispositivos las aberraciones se generan reflejando un haz estático sobre la superficie de un espejo en el cual se ha impreso previamente el patrón turbulento que puede cambiar dinámicamente de forma controlada para simular la evolución de la turbulencia atmosférica. Espejos piezoeléctricos deformables, espejos bimorfos y mecanismos de cristal líquido son ejemplos de este tipo de generadores de turbulencia.
- En los generadores activos que trabajan en transmisión, la turbulencia es generada haciendo pasar un haz estático a través de un medio turbulento que se mueve y evoluciona continuamente, un ejemplo de un generador de turbulencia de este tipo es el que se basa en la mezcla de un fluido, que puede ser agua o aire, o también dispositivos de cristal líquido, donde el último ejemplo permite el control de la variable del tiempo, es decir, de la evolución temporal, mientras que el primero no.
- En el método pasivo de transmisión se hace pasar un haz a través de una placa de material transmisivo, por ejemplo vidrio en el que previamente se ha impreso un patrón de turbulencia eligiendo un método de impresión en particular de los varios ya existentes. La simulación de la evolución temporal se realiza rotando o desplazando dicha placa o pantalla. Dentro de este técnica pueden existir distintos simuladores que se diferencian unos de otros por el método utilizado para imprimir el patrón de turbulencia en el sustrato que puede ser vidrio.

2.2 DISPOSITIVOS QUE SIMULAN LA TURBULENCIA ÓPTICA

Se muestran a continuación las alternativas para simular turbulencia óptica.

2.2.1 Espejos deformables

Hoy en día se utilizan espejos deformables para los sistemas de OA. Estos espejos cuentan con una respuesta rápida, independencia en longitudes de onda de los distintos caminos ópticos, con una reflectividad alta y uniforme que es insensible a la polarización, propiedades que no se encuentran en los materiales birrefringentes.

Las características de los espejos deformables se establecen mediante las propiedades de distribución de las fluctuaciones de fase espacial y temporal y el grado de corrección que se desee.

La ventaja principal de los espejos deformables es que son estrictamente acromáticos en todo el intervalo espectral que se utiliza, además de que el grosor de la capa simulada es nulo. Una desventaja es que para hacer una simulación realista es necesario tener una gran resolución, es decir, trabajar con una mayor densidad de actuadores por zona.

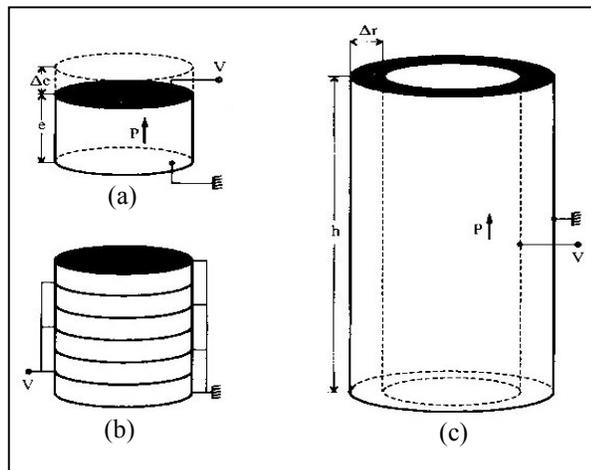
Así, los espejos deformables que en principio sirven para la corrección en sistemas de OA, pueden ser utilizados para simular la turbulencia óptica.

Dentro de los espejos deformables existen una clasificación que se menciona a continuación.

Espejos deformables con actuadores ferro eléctricos^[19]

Actuadores ferroeléctricos

Se aplica una diferencia de potencial constante V a una cerámica piezoeléctrica. La polarización induce la deformación de la superficie Δe al generar una tensión P proporcional al campo eléctrico. Como se muestra en la Figura 2.1



**Figura 2.1. Actuadores ferroeléctricos. (a) un disco. (b) discos apilados.
(c) estructura tubular.**

Espejos Segmentados

Los espejos segmentados consisten en la yuxtaposición de espejos elementales que son controlados individualmente por medio de actuadores y que en su conjunto conforman una superficie óptica “semicontinua” [19] Figura 2.3 y Figura 2.2.

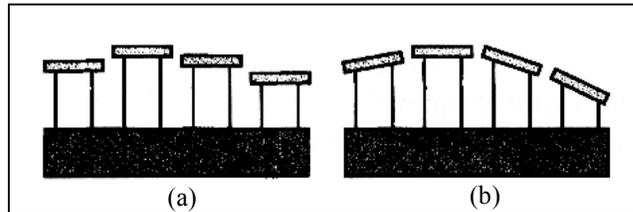


Figura 2.2. Dos configuraciones de espejos segmentados. En (a) se observa sólo pistón y en (b) pistón y tip/tilt.

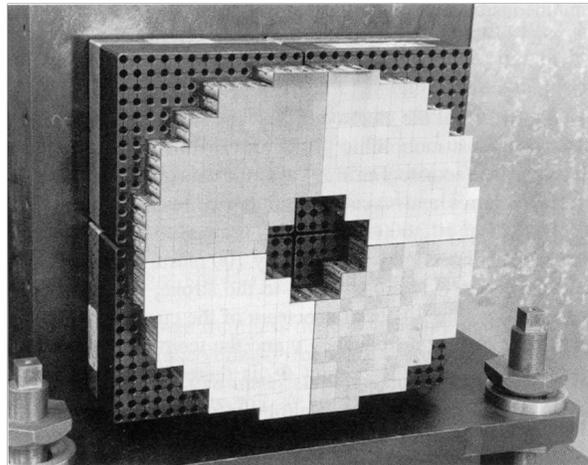


Figura 2.3. Espejo segmentado de 512 elementos de ThermoTrex Corporation.

Espejos monolíticos piezoeléctricos

Los espejos monolíticos piezoeléctricos están formados por una delgada capa de vidrio reflejante unido a la cara superior de un disco piezoeléctrico monolítico. Se colocan un conjunto de actuadores en la superficie por medio de una red de electrodos. Para la deformación se aplica un voltaje V en los electrodos que induce a una ligera deformación local en la cara superior del espejo y ninguna deformación en la cara inferior si el grosor del espejo es superior al espaciado entre electrodos. En la Figura 2.5 se muestra una fotografía de un espejo monolítico piezoeléctrico.

Existen diferentes configuraciones para espejos piezoeléctricos deformables de superficie continua tal como se muestra en la Figura 2.4.

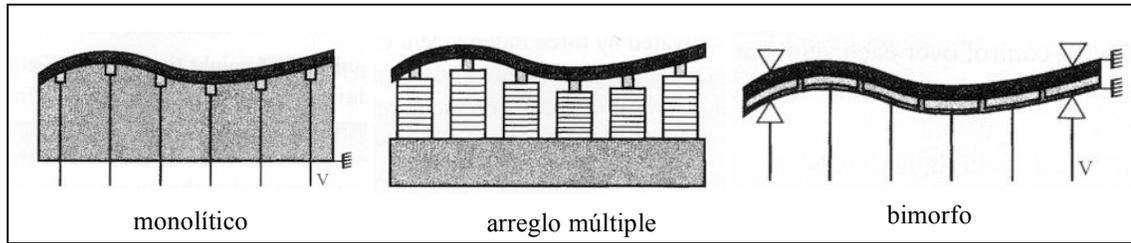


Figura 2.4. Espejos piezoeléctricos deformables de superficie continua.



Figura 2.5. Espejo monolítico piezoeléctrico con 345 actuadores (MPM) de ITEK.

Espejos deformables con actuadores discretos o arreglo múltiple

Los espejos deformables con actuadores discretos como los que se muestra en las Figura 2.5 y Figura 2.6 se han utilizado ampliamente en sistemas astronómicos de OA. Su estructura consiste en una superficie continua de vidrio reflejante deformada por un arreglo axial de actuadores discretos -que empujan y jalan (push-pull)- montados en un soporte rígido. Sus principales características están dadas por el número de actuadores, el espaciamiento entre ellos, su movimiento y voltaje suministrado.



Figura 2.6. Espejo deformable con 341 actuadores discretos (SELECT) de LITTON-LITEK.

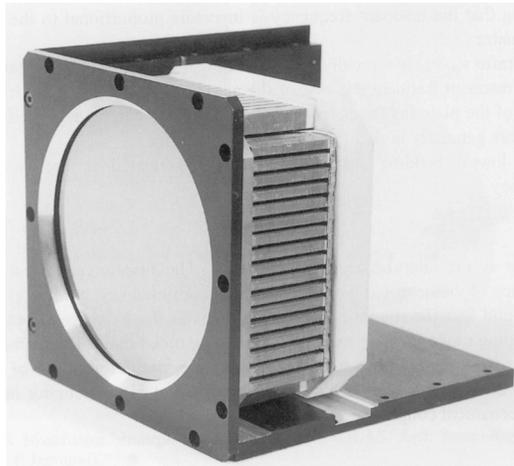


Figura 2.7. Espejo deformable con 249 actuadores (SAM) de CILAS .

Espejos bimorfos

Un espejo bimorfo como el de la Figura 2.8 está formado por dos discos de cerámica unidos y polarizados opuestamente, paralelamente a su eje. Se coloca un arreglo de electrodos entre los dos discos y tanto la superficie superior como la inferior se conectan a tierra. Cuando se aplica un voltaje a un electrodo, el disco se

contrae localmente y lateralmente mientras que el otro disco se expande induciendo una curvatura.

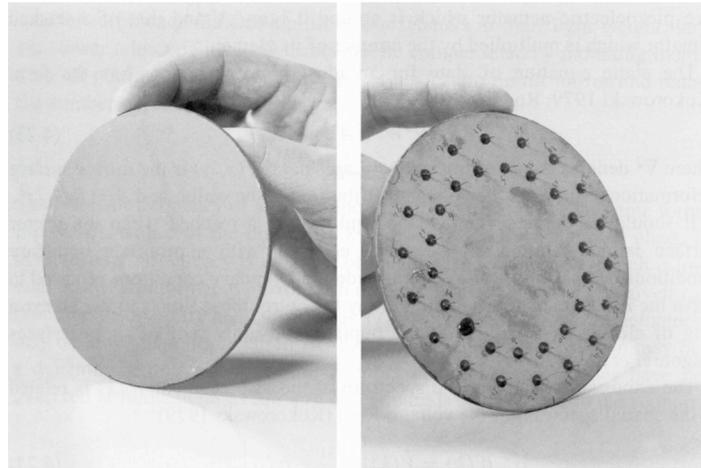


Figura 2.8. Espejo bimorfo con 36 actuadores (BIM) de CILAS. Izquierda: vista anterior. Derecha: vista posterior.

Espejos deformables con actuadores no ferroeléctricos^[19]

Espejos de membrana

Los espejos de membrana consisten en una membrana reflejante estirada sobre un anillo y deformado por medio de fuerzas electrostáticas dentro de una cámara de vacío parcial. Comparado con la superficie continua de un espejo deformable, un espejo de membrana no tiene inercia ni histéresis.

La curvatura local es proporcional al cuadrado del voltaje V que se aplica a la red que conduce a las almohadillas y la membrana. El esquema del espejo de membrana se muestra en la Figura 2.9.

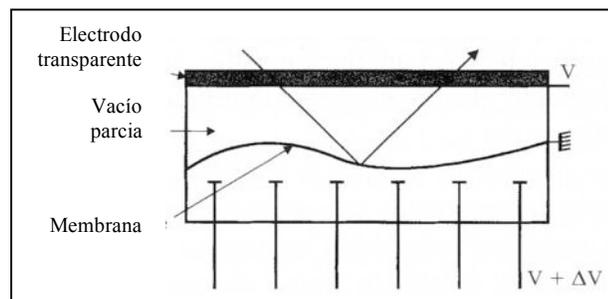


Figura 2.9. Esquema de espejo de membrana.

2.2.2 Dispositivos de cristal líquido

Cristal líquido (CL) se refiere a un estado de la materia intermedio entre sólido y líquido. La propiedad óptica fundamental de CL es su birrefringencia. Es mayor que en los cristales electro-ópticos debido al proceso anisotrópico de orientación de sus moléculas. Los dispositivos de cristal líquido (DCL) tienen un bajo costo, un mayor número de elementos correctores, bajo consumo de potencia y un tamaño compacto sin partes que puedan moverse.

Modulador espacial de luz ferroeléctrico de cristal líquido FLCSLM.

El modulador espacial de luz ferroeléctrico de cristal líquido o FLCSLM por sus siglas en inglés se pensó como una alternativa para simular la turbulencia atmosférica. Se debe trabajar con luz monocromática polarizada debido a la técnica holográfica utilizada. Por su tamaño pequeño es necesario utilizar reductores focales que en su momento dan como resultado grandes ángulos de incidencia en el simulador del telescopio, cuando se consideran objetos fuera de eje.

Modulador espacial de luz de cristal líquido LCSLM.

Las perspectivas para los LCSLMs son buenas para convertirse en alternativas serias para los espejos deformables en un futuro cercano, aunque su comportamiento en términos de cromaticidad y tamaño no es prometedor para un simulador de turbulencia atmosférica.

2.2.3 Generadores de turbulencia por medio de mezcla de fluidos

Un generador de turbulencia por medio de mezcla de fluidos es una *caja* en la que se mezcla aire o agua a diferentes temperaturas por diferentes lugares con el fin de crear el mismo efecto turbulento que se tiene en la atmósfera.

La mayor desventaja de estos simuladores es que no se tiene el control sobre las variables espacial y temporal. Cada evento que se realice en este simulador es único y las variables no pueden ser manipuladas de forma independiente.

2.2.4 Placas de transmisión estáticas o pantallas de fase

En este tipo de generador de turbulencia, el patrón de turbulencia atmosférica se imprime en la superficie sobre la que incide el haz libre de aberraciones. El principio es el mismo para todos las placas de transmisión o pantallas de fase, (aunque también pueden operar en reflexión). Es muy recomendable caracterizarlas, midiendo el tipo de efecto obtenido dado cierto método de impresión de las

pantallas, como cromaticidad, valor pico valle de la turbulencia generada, resolución espacial, etcétera.

Con este método se asume la llamada hipótesis de Taylor (i.e. turbulencia congelada que se desplaza a una velocidad v) simulando la evolución temporal con un desplazamiento o rotación de las pantallas de fase.

Existen distintos métodos de impresión del patrón de turbulencia óptica, se mencionan a continuación tres de ellos: hologramas generados por computadora^[15] (CGH por sus siglas en Inglés), unión de índice de refracción cercano (NIM)^[17], pantallas de fase con múltiples capas de acrilatos^[21].

Hologramas generados por computadora (CGH)

Se ha desarrollado un nuevo tipo de sistema generador de frentes de onda que incorpora hologramas generados por computadora (CGH). Con la técnica holográfica es posible grabar y generar una imagen tridimensional de un objeto por medio de un interferograma producido por la interferencia entre el haz láser de referencia y un haz reflejado por el objeto a ser grabado. Es, en general posible generar cualquier frente de onda si se hace pasar un haz láser a través de un holograma en el que se graba un interferograma. El patrón holográfico necesario para generar una distribución de frente de onda deseado se simula numéricamente por computadora. Entonces es factible hacer un holograma copiando este patrón en una película transparente. Si el holograma se mueve en el plano perpendicular al haz, se puede simular la variación temporal de la turbulencia que corresponde al “flujo congelado” de la turbulencia atmosférica.

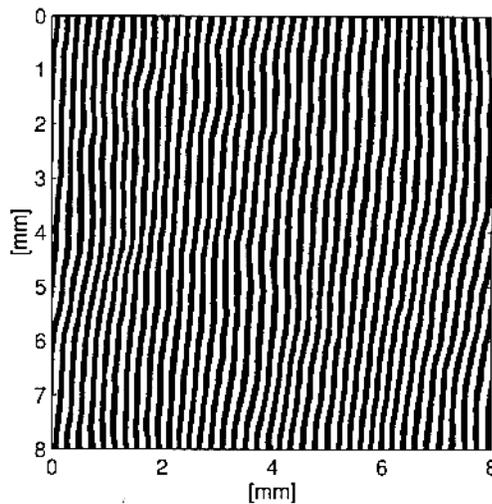


Figura 2.10. Ejemplo de holograma CGH.

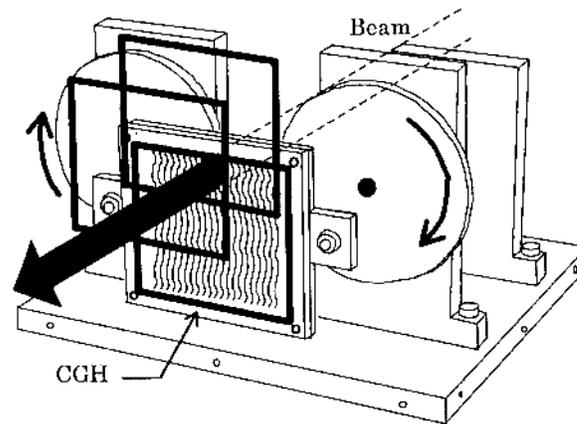


Figura 2.11. Esquema del montaje del simulador de turbulencia basado en pantallas de fase CGH.

Unión de índice de refracción cercano

El principio de unión de índices de refracción cercanos NIM (near-index matching) en general se puede describir como la unión de dos materiales ópticos con un perfil de la superficie arbitrario. Para el caso de simulación de turbulencia óptica atmosférica debe entonces el perfil corresponder a este fenómeno. Si se asume que las superficies externas de las pantallas de fase son planas y la incidencia del haz es normal a la primera superficie, la diferencia de camino óptico DCO (o OPD por sus siglas en inglés) de los rayos que pasan a través de la pantalla es

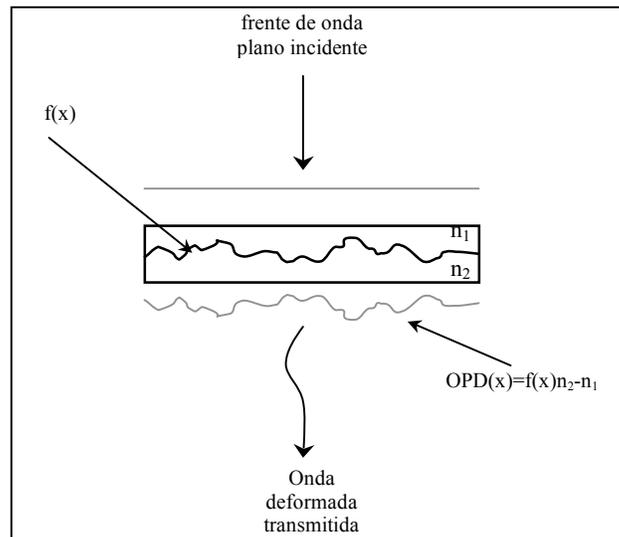


Figura 2.12. Principio de operación de una pantalla fase que trabaja con NIM.

$$\begin{aligned} OPD(x, \lambda) &= [f(x) - \bar{f}][n_2(\lambda) - n_1(\lambda)] \\ &= \Delta f(x) \Delta n(\lambda). \end{aligned} \quad (1.12)$$

Pantallas de fase con múltiples capas de acrilatos.

Para las pantallas de fase con múltiples capas de acrilatos (Figura 2.13) se necesita una superficie óptica (vidrio, acrílico) sobre la que se rocía laca para cabello ordinaria, que contiene un componente llamado Anfómero (Octilacrilamida, Acrilato, Butilminoetil Metacrilato), que asemeja a la resina, y genera una distribución aleatoria. Es necesario un método óptimo para la adecuada deposición de los acrilatos y para lograr en la pantalla de fase una distribución espacial que emule a la turbulencia descrita por Kolmogorov.

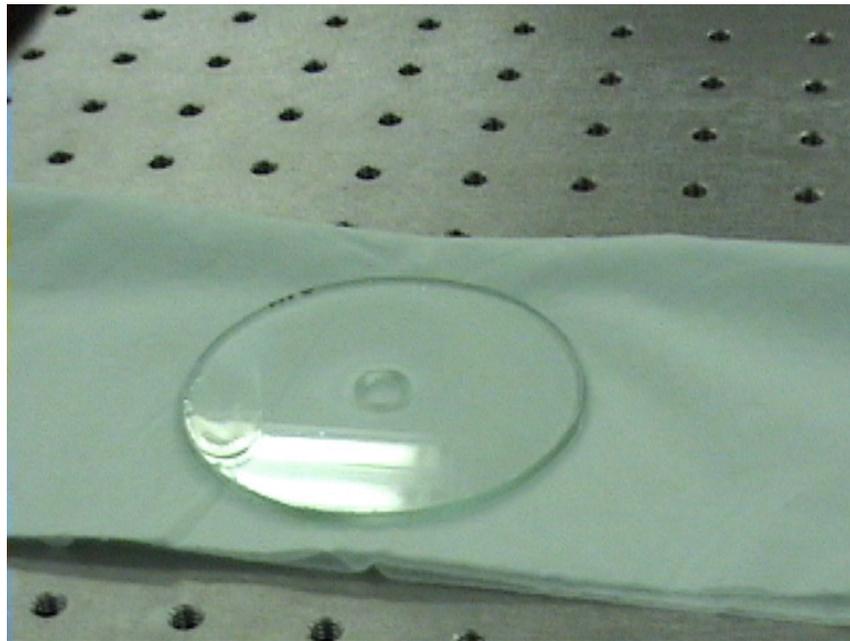


Figura 2.13. Pantalla de fase con múltiples capas de acrilatos realizada en el laboratorio de óptica del IA-UNAM.

2.3 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LAS ALTERNATIVAS PARA SIMULAR LA TURBULENCIA ÓPTICA

Las distintas técnicas muestran diferentes características en funcionamiento y costos. Algunas alternativas son demasiado caras o complejas.

En suma:

1. Los espejos deformables o los LCSLM no son lo suficientemente rápidos como para modular el error del frente de onda. Los espejos deformables son una muy buena opción para un sistema de óptica adaptativa pero no para un simulador de turbulencia atmosférica. Un simulador de turbulencia necesita una gran densidad de actuadores que necesitan mucho tiempo para ser calibrados. Además el diseño óptico es complicado y no permite una óptica multiconjugada. Una alternativa son los MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) dichos sistemas integran elementos mecánicos, sensores, actuadores y electrónica en un sustrato de silicón fabricado con microtecnología.
2. El mezclador de aire frío y caliente como propuesta de un generador de turbulencia óptica provee características únicas: alta resolución espacial y cromaticidad. Pero la turbulencia producida no es repetible y no se tiene control sobre las componentes temporal y espacial de la turbulencia de forma independiente. Además, esta técnica no produce un error o una suficiente amplitud en la variación del frente de onda.
3. El requerimiento de cromaticidad se satisface por las pantallas NIM pero en un subintervalo de la banda nominal requerida. Las pantallas NIM son la segunda opción más barata después de las pantallas acromáticas (CHG).
4. Los distintos métodos de generación de pantallas de fase (CGH, NIM, platos de fase) resultan ser muy útiles si se quieren simular múltiples capas turbulentas. Su bajo costo de manufactura y montaje sencillo aventaja a otros métodos. Es la técnica de generación de turbulencia óptica más adecuada de acuerdo con las necesidades actuales del IA-UNAM.

2.4 PANTALLAS DE FASE DE MATERIAL ACRÍLICO TRANSPARENTE: TÉCNICA ELEGIDA PARA SIMULAR LA TURBULENCIA ÓPTICA EN EL IA-UNAM

Los elementos de los que se hará uso para simular la turbulencia óptica atmosférica serán pantallas de fase para el posterior desarrollo e implementación del simulador.

La técnica elegida para la generación de turbulencia óptica fue la de *Pantallas de fase con múltiples capas de acrilatos*.

Después de haber elegido la técnica, el siguiente etapa de este trabajo consistió en fabricar y caracterizar las pantallas de fase. Ya en una etapa posterior a el presente trabajo, se realizará el montaje de las pantallas en el simulador de turbulencia.

Previo a la generación y caracterización de las pantallas de fase, decidimos llevar a cabo simulaciones numéricas de la turbulencia óptica con el fin de familiarizarnos con el fenómeno y de calibrar las pantallas obtenidas en laboratorio. En el siguiente capítulo se detalla el proceso de generación numérica de mapas de fase. Posteriormente desarrollamos programas para el análisis de las características estadísticas de las simulaciones. De este modo se obtuvieron rutinas bien calibradas para la caracterización de las pantallas de fase que generamos en laboratorio.

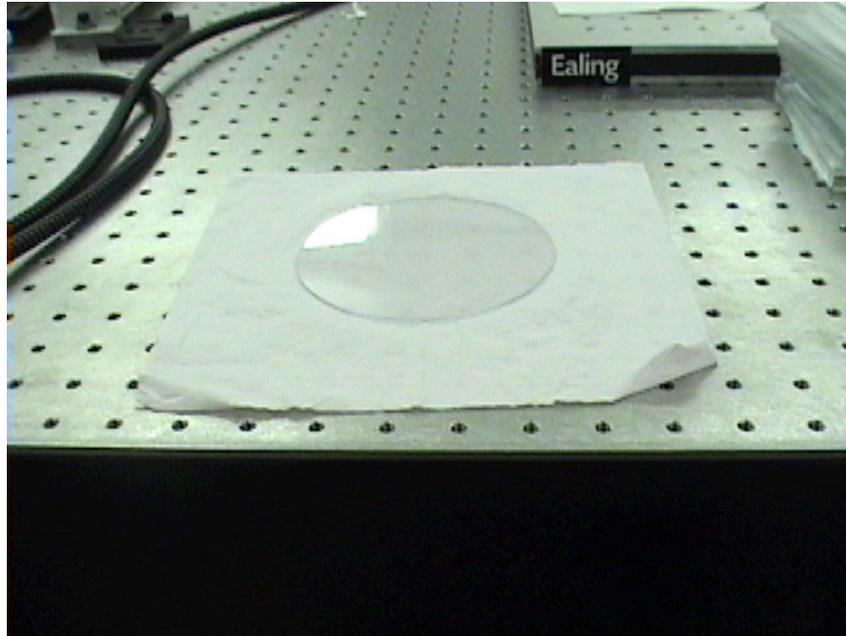


Figura 2.14. Pantalla de fase de material acrílico fabricada en el laboratorio de óptica del IA-UNAM.

CAPÍTULO 3 SIMULACIÓN NUMÉRICA DE MAPAS DE FASE Y DE MAPAS DE AMPLITUD

En el presente capítulo se explica la simulación numérica de mapas de fase y de amplitud por medio de TurbuLenZ. Se muestran las imágenes obtenidas con dichas simulaciones y se expone la realización del cálculo del ancho a media altura (FWHM) de una imagen integrada. También se muestra la utilización de un factor de escala para generar mapas de fase y amplitud con cualquier valor de r_0 a partir de los ya existentes.

La idea de utilizar TurbuLenZ surgió de la necesidad de contar con un frente de onda deformado por la turbulencia atmosférica con características bien establecidas y conocidas para probar los programas que se utilizarán para caracterizar las pantallas de fase generadas en laboratorio .

TurbuLenZ es un código desarrollado por el doctor Robert Weiss, del Instituto de Astronomía Max Planck (Heidelberg)^[25]. Consiste en una colección de rutinas escritas en IDL (Interactive Data Language) basadas en un código hecho previamente en C especialmente para simular la turbulencia óptica. Las rutinas simulan las fluctuaciones de fase y de amplitud de un frente de onda que atraviesa una o más capas turbulentas de la atmósfera. El programa permite variar parámetros generales en los que se incluye el número y altura de las capas a simular, el muestreo deseado y la intensidad de la turbulencia para cada capa definida por el valor de r_0 . Además es posible modificar parámetros de almacenamiento y parámetros de las capas turbulentas, así como las características del telescopio a utilizar. La versión utilizada fue TurbuLenZ04 modificado por el doctor Leonardo Sánchez y Sergio González^[11].

Así, la generación numérica de mapas de fase y de amplitud (pantallas de fase y de amplitud) por medio de TurbuLenZ es fundamental para tener una referencia congruente y confiable para el análisis de las características del frente de onda

deformado y al mismo tiempo para el estudio de las imágenes de un haz de luz de una fuente luminosa que atraviesa un medio turbulento.

3.1 SIMULACIÓN NUMÉRICA DE MAPAS DE FASE Y DE AMPLITUD POR MEDIO DE TURBULENZ

Para generar numéricamente las pantallas de fase y de amplitud utilizando TurbuLenZ04 en una PC con IDL se requiere:

1. Crear el archivo de entrada (.inp), que contiene los datos numéricos de los parámetros deseados y necesarios para TurbuLenZ.
2. Leer el archivo de entrada en otro programa (batch) mismo que compila y ejecuta el código TurbuLenZ .

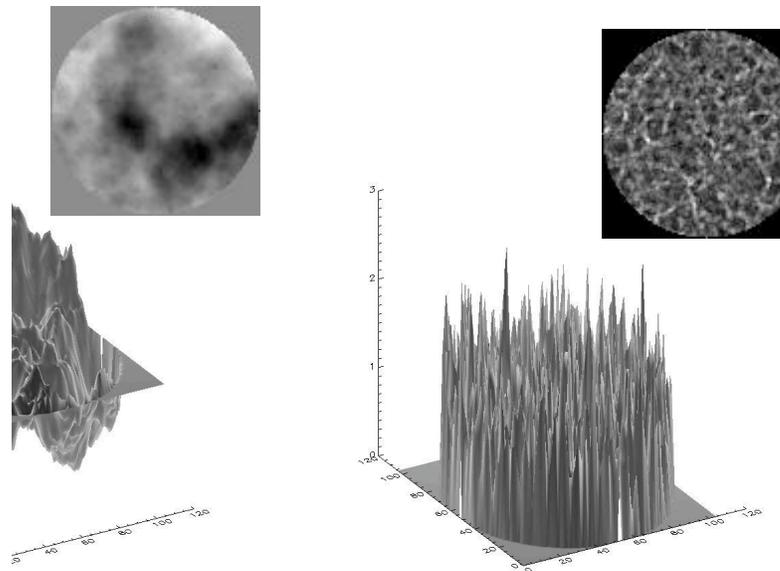


Figura 3.1. Ejemplo de generación numérica de mapas de fase (en radianes) y amplitud (con intensidad normalizada a 1).

Los parámetros que se requieren para la simulación de los mapas de fase se introducen un archivo .inp en el orden que se muestra en el ejemplo siguiente. En la Figura 3.1 se muestra un ejemplo de los mapas de fase generados numéricamente por TurbuLenZ.

Ejemplo de archivo .inp

Parámetros generales

- | | |
|---|------------------------------|
| 2 | Número de capas turbulentas. |
| 1 | Número de telescopios. |

1	Número de estrellas.
10	Número de pasos de tiempo.
38.1	Escala de píxel en el plano de la apertura (píxeles por metro).
0.0000005	Longitud de onda (metros).
500	Diferencia de altura en metros a partir de la cual se aplica la difracción de Fresnel para propagar el frente de onda.

Parámetros de almacenamiento

0	1: guarda las pantallas de fase totales; 0 no guarda.
4	bit 0=1 Guarda los centroides e intensidades. bit 1=1 Guarda la distribución de intensidad en el plano pupila (speckles). bit 2=1 Guarda las pantallas de fase y amplitud de los telescopio.
0	Análogo al anterior pero individualmente para cada capa.
1	Número del primer archivo.
2	Si = 1: inicializa la pantalla de fase al primer paso de tiempo. Usa el disco duro para archivos temporales. Si = 2: inicializa la pantalla de fase al primer paso de tiempo. Usa la RAM para archivos temporales.

Parámetros de las capas turbulentas

100.0	Factor de decorrelación.
25.0	Escala externa de turbulencia (metros).
0.4	Velocidad del viento (metros sobre paso de tiempo).
0.0	Dirección del viento (grados en dirección opuesta a las manecillas del reloj. 0 grados indicando que la pantalla se mueva hacia la derecha).
0.15	r_0 (metros).
5000.0	Altura de la capa (metros). <i>Repetir para cada capa</i>
100.0	Factor de decorrelación.
25.0	Escala externa de turbulencia (metros).
0.4	Velocidad del viento (metros sobre paso de tiempo).
45	Dirección del viento (grados en dirección opuesta a las manecillas del reloj. 0 grados indicando que la pantalla se mueva hacia la derecha).
0.15	r_0 (metros).
5000	Altura de la capa (metros).

Telescopio(s)

2.1	Abertura (metros).
0.015	Escala del píxel en el plano imagen (segundos de arco por

	píxel).
256	Tamaño de las imágenes en el plano pupila (píxeles).
0.0	Posición relativa x del telescopio (metros).
0.0	Posición relativa y del telescopio (metros).
0.0	Dirección x (segundos de arco), para la primera estrella.
0.0	Dirección y para la primera estrella.
	<i>Repetir para cada estrella</i>
123456789	Indica que se ha llegado al final del archivo.

Se realizaron pruebas de generación numérica de los mapas de fase y de amplitud con distintos parámetros simulando el telescopio de 2.1 m de San Pedro Mártir. Los parámetros que variaron fueron: el número de capas turbulentas, el muestreo (escala de píxel) y el valor del r_0 total integrado a través de las capas (ecuación 1.9).

3.1.1 Principio del Algoritmo de Corrección del Enrollamiento de Fase

La fase simulada en cada punto toma valores 0 y 2π (módulos de 2π). Sin embargo, el rango de valores en la pantalla es mayor que 2π . Para corregir el efecto de saltos de fase o fase envuelta (entre píxeles adyacentes) se desarrolló un algoritmo de corrección basado en mínimos cuadrados y se implementó dentro de TurbuLenZ obteniendo en todos los casos una corrección satisfactoria^[17, 20]. En la Figura 3.2 se muestra un ejemplo de pantalla de fase generada con TurbuLenZ04 sin corrección de enrollamiento.

Para generar las pantallas de fase TurbuLenZ utiliza la función tangente definida en el intervalo abierto de $\theta \in \left(-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right)$, ver Figura 3.3. El enrollamiento de fase es el resultado de dicha función que es biyectiva sólo en el dominio $\theta \in \left(-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right)$.

Dada esta situación se tiene que “desenrollar la fase”; en el caso de TurbuLenZ existía un algoritmo que corregía dicho defecto por renglones y columnas. La versión 04 de TurbuLenZ utilizaba un algoritmo para corregir el enrollamiento de fase que realiza un recorrido por la matriz generada (mapa de fase) por líneas y columnas, al resultado final de la corrección agrega defectos (artefactos) que no corresponden al mapa de fase original. En la etapa de pruebas se encontró que TurbuLenZ generaba mapas de fase con una corrección defectuosa del enrollamiento de fase. Durante este trabajo, se programó un mejor algoritmo de corrección del enrollamiento de fase llamado *phase unwrapping* (descrito en el Apéndice A) para suavizar las transiciones en la estructura de la fase y hacerla continua, tal y como se produce en la atmósfera turbulenta.

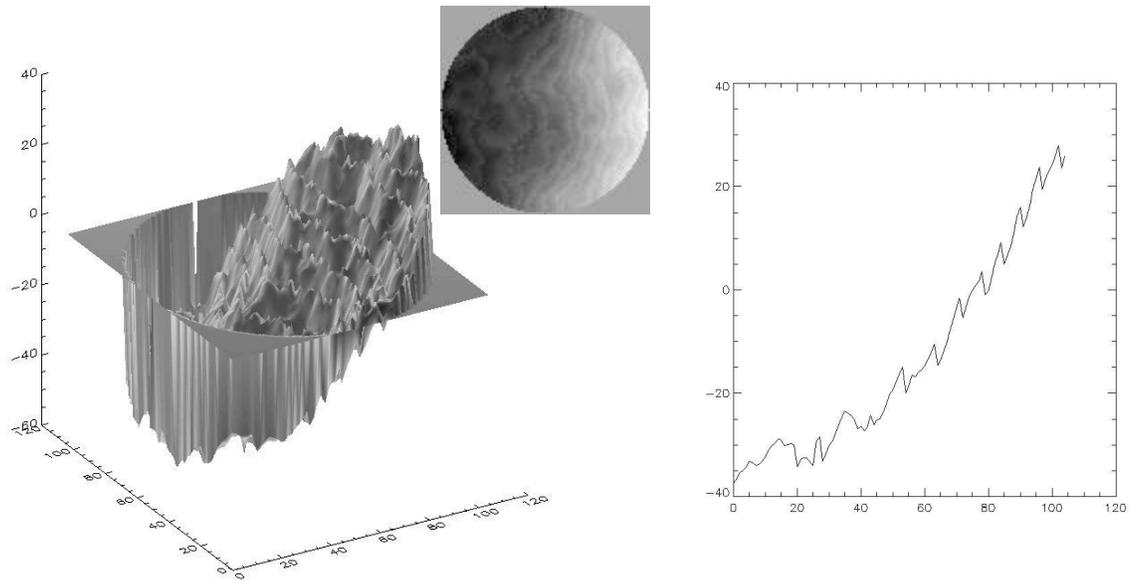


Figura 3.2. Pantalla de fase (rad vs pix). 2 capas a 5 km y 15 km $r_0(\lambda=0.5\mu\text{m})=10\text{cm}$ sin corrección del enrollamiento de fase. Nótese los saltos de 2π en la fase en forma de diente de sierra.

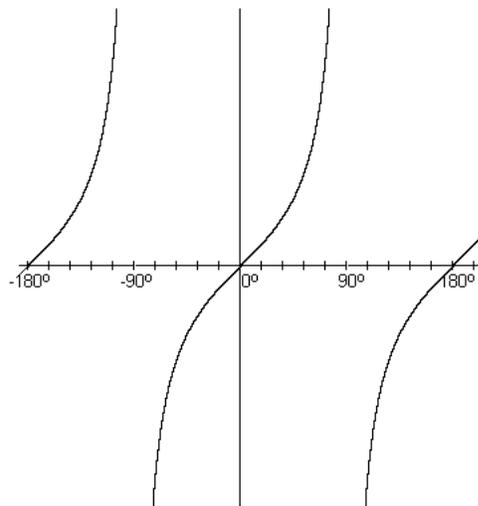


Figura 3.3. Función tangente.

En la Figura 3.4 se muestran las pantallas de fase generadas con TurbuLenZ04 corregidas con el algoritmo adecuado, utilizando el algoritmo de los mínimos

cuadrados [!Error!No se encuentra el origen de la referencia.]. Para una explicación más detallada ver el Apéndice A.

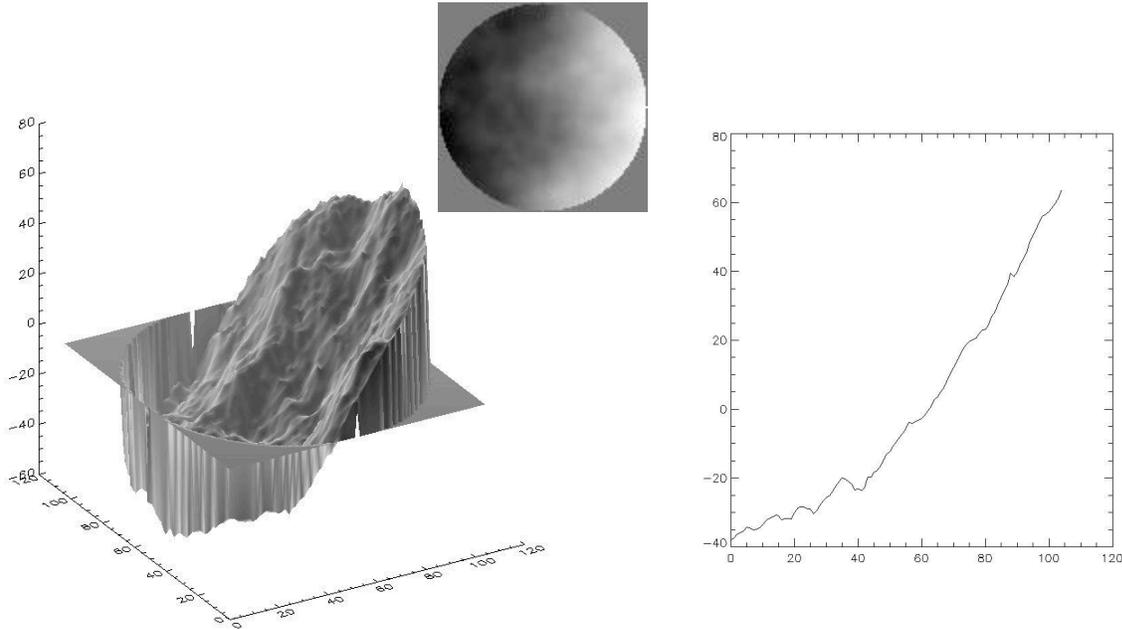


Figura 3.4. Pantalla de fase. 2 capas $r_0(\lambda=0.5\mu\text{m})=10\text{cm}$ algoritmo de corrección basado en mínimos cuadrados.

3.1.2 Imágenes Obtenidas para el Telescopio de 2.1 m del OAN-SPM

Para obtener una imagen simulada es necesario conocer la amplitud y fase del frente de onda que la produce. Al obtener las pantallas de amplitud y de fase, se forma la onda compleja: $U=A\exp^{i\phi}$ y se simula el efecto de filtrado espacial que produce la pupila de un telescopio de 2.1m de diámetro. Posteriormente se calcula la imagen instantánea de speckles con un tiempo de exposición $t < 10$ milisegundos, producida en el plano imagen del telescopio. La imagen de largo tiempo de exposición es la imagen integrada o suma de un conjunto de imágenes instantáneas en el plano imagen.

La imagen en el plano focal se calcula por medio del módulo cuadrado de la transformada de Fourier (FFT) de la onda compleja:

$$\text{Intensidad} = |FFT(U)|^2. \quad (3.1)$$

Si el tiempo de exposición es largo, es decir mayor a un segundo, la imagen, obtenida como la integración de un cierto número de imágenes instantáneas, tendrá la forma de una distribución gaussiana bidimensional.

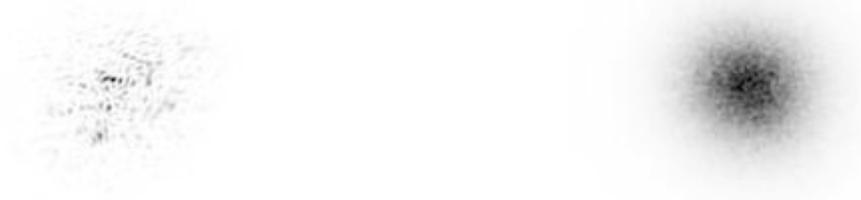


Figura 3.5. Imágenes obtenidas con pantallas de fase y amplitud generadas numéricamente con un $r_0(\lambda=0.5\mu\text{m})=10\text{cm}$, 2 capas (a 5 km y 25 km). (a) Imagen instantánea –speckles- (10 ms). (b) Imágen integrada (200 imágenes instantáneas, 2 segundos de integración).



Figura 3.6. Imágenes obtenidas con pantallas de fase y amplitud generadas numéricamente con un $r_0(\lambda=0.5\mu\text{m})=20\text{cm}$, 2 capas (a 5 km y 25 km). (a) Imagen instantánea –speckles- (10 ms). (b) Imágen integrada (200 imágenes instantáneas 2 segundos de integración).

Considerando que el tiempo de exposición de una imagen instantánea de acuerdo al muestreo es de 10ms, 200 imágenes instantáneas corresponden a 2 segundos de exposición. En la Figura 3.5 y en la Figura 3.6 se muestran las imágenes obtenidas para a una misma longitud de onda $\lambda=0.5\mu\text{m}$ considerando dos capas turbulentas a 5 km y 15 km de altura sobre el nivel del mar (*snm*) para dos valores distintos de r_0 integrado: 10 cm y 20 cm. Notamos que al mejorar las condiciones de turbulencia óptica (i.e. aumentar el valor de r_0) el FWHM de la imagen integrada disminuye, es decir el tamaño de la mancha es menor, hay mayor coherencia en el haz y por lo tanto la resolución angular es mejor.

3.1.3 Ajuste Gaussiano para el Cálculo del Ancho a Media Altura (FWHM)

El término técnico llamado *Ancho a media altura* o *FWHM* (por sus iniciales en inglés) se utiliza para describir una medida del ancho o del tamaño de un objeto en una fotografía o imagen (objeto puntual), y cuando dicho objeto no es nítido. El perfil que describe la imagen de un objeto puntual en estudios astronómicos se acerca mucho a una distribución gaussiana cuya descripción matemática está dada por la función

$$f(x) = A \exp \frac{-u^2}{2\sigma^2}, \quad (3.2)$$

$$\text{donde } u^2 = x^2 + y^2.$$

Para poder comparar diferentes perfiles, se utiliza el parámetro gaussiano en el denominador de la expresión matemática usualmente representado por la letra griega σ . Existe una alternativa que permite aproximar de mejor manera el tamaño de la imagen de la estrella vista por el ojo, que es el ancho a través del perfil cuando llega a la mitad del pico o valor máximo. Esto es el ancho de una imagen en el valor medio del máximo. Es decir, ancho a media altura. Es un número bien definido que puede usarse para comparar la calidad de las imágenes obtenidas bajo diferentes condiciones de observación. En el campo de la Astronomía la medición del ancho a media altura de las imágenes se conoce como *seeing* o *calidad de imagen*.

Una forma parametrizada de expresar una distribución gaussiana es la que se muestra en la ecuación:

$$g(x, y) = A_0 + A_1 \exp \left[\frac{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}{2\sigma^2} \right], \quad (3.3)$$

donde para fines de cálculos numéricos x_0 y y_0 son las coordenadas del centro del haz luminoso en la matriz imagen, A_0 es un offset, A_1 es factor de normalización y σ es la varianza de la función gaussiana.

Así pues podemos obtener el ancho a media altura FWHM en función de la varianza para una distribución gaussiana:

$$\exp\left[-\frac{u^2}{2\sigma^2}\right] = \frac{1}{2}$$

$$-\frac{u^2}{2\sigma^2} = \ln 2 = 0.6931$$

$$u = 2^{\frac{1}{2}}\sigma(0.6931)^{\frac{1}{2}}$$

$$u = \pm 1.1774\sigma$$

por lo tanto el ancho a media altura (FWHM) está dado por 2.35σ .

Se realizaron programas para calcular el ancho a media altura FWHM de las imágenes integradas. El ajuste de la distribución se realizó sobre la imagen de largo tiempo de exposición (número total de imágenes integradas=200) con un r_0 dado (ver descripción de rutina de IDL llamada `gaussfit2dim.proc` en el Apéndice A).

Para todos los cálculos del ancho media altura (FWHM) se tendrá en cuenta el mismo diámetro del telescopio (2.1 m), el mismo tamaño de pupila (105 pix) y del plano de análisis (256 pix), así como la longitud de onda a la que se trabaja ($\lambda=0.5\mu\text{m}$) para obtener los cálculos teóricos del seeing ϵ . Ver Figura 3.7.

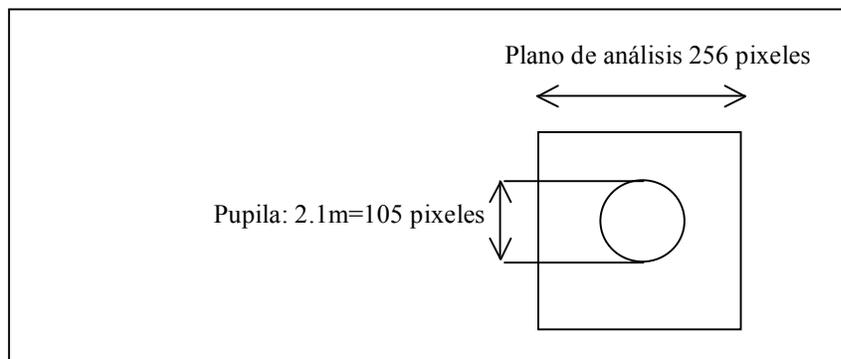


Figura 3.7. Esquema del plano de la pupila y de la pupila misma.

La escala de píxel en el plano pupila es

$$\frac{105 \text{ pix (pupila)}}{2.1 \text{ m (telescopio)}} = 50 \text{ pix / m}$$

Tamaño del área de análisis en el plano imagen.

$$\frac{256 \text{ pix (longitud lateral del plano de análisis)}}{50 \text{ pix / m}} = 5.12 \text{ m}$$

Muestreo en el plano imagen

$$\frac{\lambda}{(L)(\text{pix})} = \frac{0.5 \mu\text{m}}{5.12 \text{ m}} = 9.76 \times 10^{-8} \text{ rad/pix} = (9.76 \times 10^{-8}) (206265 \text{ "/pix}) = 0.0201 \text{ "/pix}$$

Los cálculos para la obtención del seeing ε (resolución angular) son:

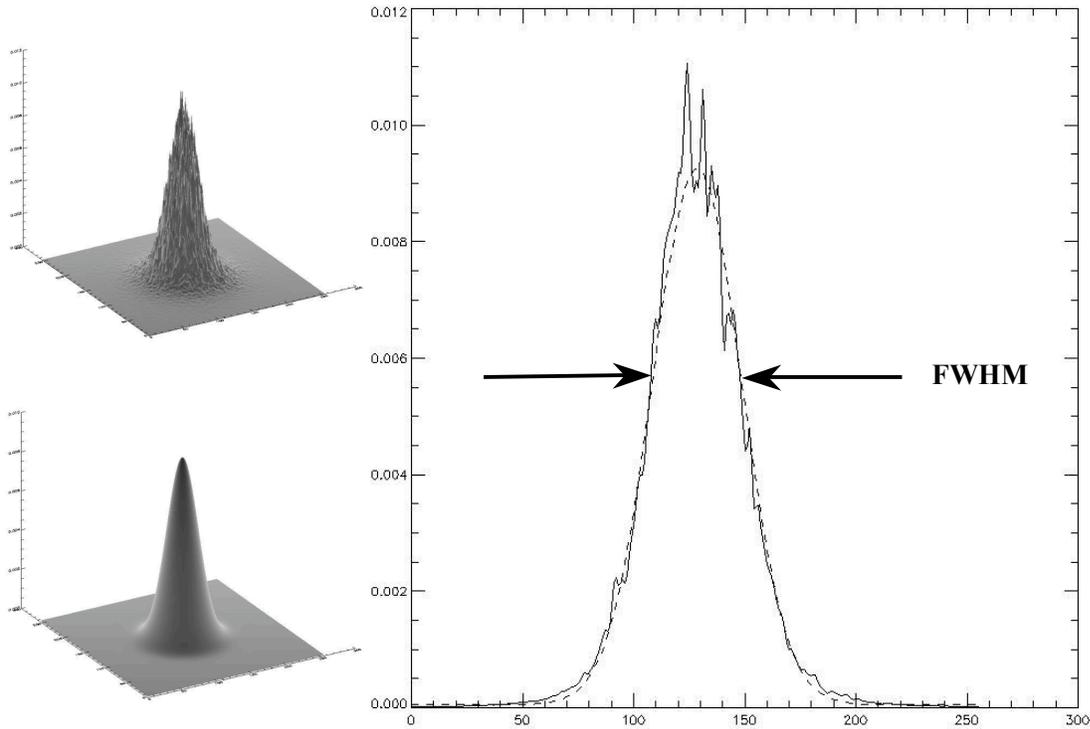


Figura 3.8. Izquierda arriba: imagen integrada. Izquierda abajo: imagen integrada ajustada a una gaussiana. Derecha. Ancho a media altura (FWHM) de la imagen con un r_0 característico de 10 cm; escala del píxel en el plano imagen de 0.020 segundos de arco por píxel.

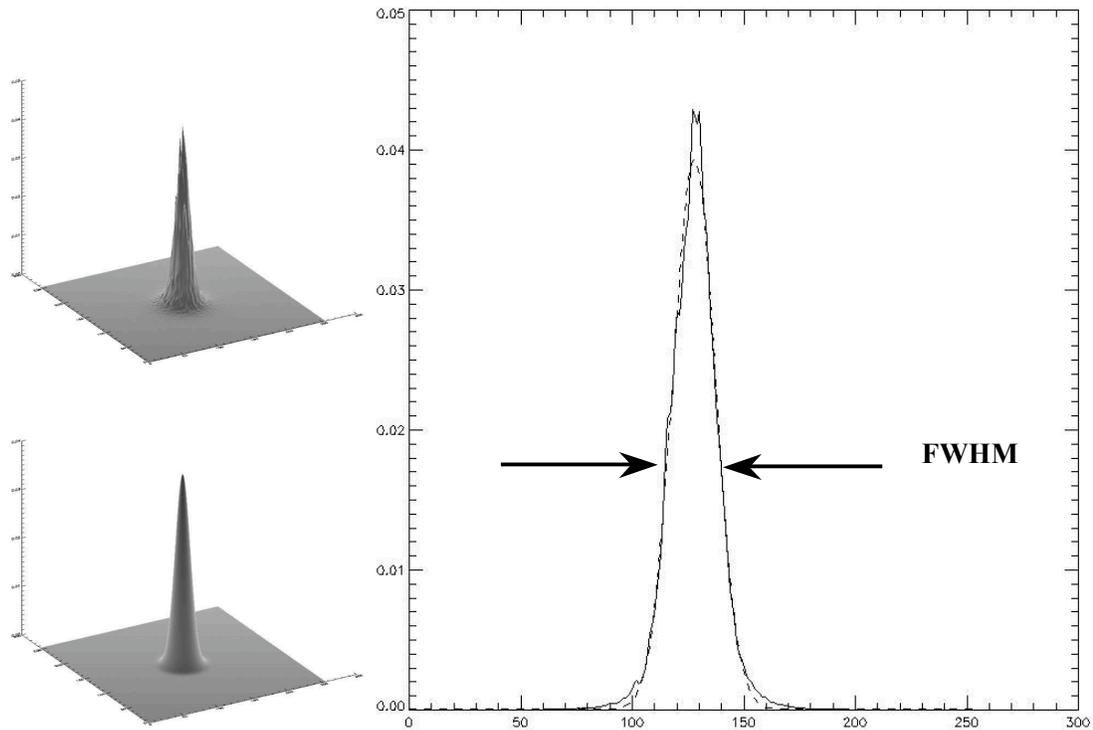


Figura 3.9. Izquierda arriba: imagen integrada. Izquierda abajo: la imagen integrada ajustada a una gaussiana. Derecha. Ancho a media altura (FWHM) de la imagen integrada con un r_0 característico de 20 cm; escala del píxel en el plano imagen de 0.020 segundos de arco.

FWHM teórico

Para $r_0(\lambda=0.5\mu\text{m}) = 10 \text{ cm}$

$$FWHM = 0.98 \frac{\lambda}{r_0} = 0.98 \frac{0.5\mu\text{m}}{10\text{cm}} = 4.88 \times 10^{-6} \text{ rad}$$

$$(4.88 \times 10^{-6} \text{ rad}) \times 206265 = 1.00''$$

FWHM calculado 46 pixeles

Seeing teórico para $r_0(\lambda=0.5\mu\text{m})= 10 \text{ cm}$

$\epsilon=1.00$ segundos de arco

Seeing calculado para $r_0(\lambda=0.5\mu\text{m})= 10 \text{ cm}$

$\epsilon=0.92$ segundos de arco

FWHM teórico

Para $r_0(\lambda=0.5\mu\text{m}) = 20 \text{ cm}$

$$FWHM = 0.98 \frac{\lambda}{r_0} = 0.98 \frac{0.5 \mu m}{20 cm} = 2.44 \times 10^{-6} rad$$

$$(2.44 \times 10^{-6} rad) \times 206265 = 0.50''$$

FWHM calculado 22.28 pixeles

Seeing teórico para $r_0(\lambda=0.5\mu m)=20$ cm $\epsilon=0.50$ segundos de arco

Seeing calculado para $r_0(\lambda=0.5\mu m)=20$ cm $\epsilon=0.44$ segundos de arco

La distribución estadística de las imágenes obtenidas por medio de las pantallas de fase y de amplitud simuladas con TurbuLenZ se acerca a una distribución gaussiana. En la Figura 3.8 y en la Figura 3.9 se observa el ajuste de una gaussiana para las simulaciones de $r_0(\lambda=0.5\mu m)=10$ cm y $r_0(\lambda=0.5\mu m)=20$ cm. Se observa en la gráfica de la Figura 3.9 que el ajuste a una distribución gaussiana es muy bueno. La distribución de la energía que se tiene en una gaussiana se puede considerar equivalente a la que tenemos en una imagen integrada.

3.2 GENERACIÓN NUMÉRICA DE PANTALLAS DE FASE Y DE AMPLITUD POR MEDIO DE UN FACTOR DE ESCALA

A veces es necesario hacer pruebas con pantallas de fase con distintos valores de r_0 . Una manera sencilla y rápida de obtener pantallas de fase y de amplitud a partir de unas ya existentes es aplicar un factor de escala adecuado. Esto se realiza dentro de un programa hecho en IDL en el que dicho factor se aplica a cada píxel de la matriz original (tanto de las pantallas de fase como de amplitud) escalando los valores originales para obtener las pantallas de fase y amplitud con la estadística que corresponde al nuevo valor de r_0 , ahorrando así recursos y tiempo.

El comportamiento de la turbulencia atmosférica se puede describir con la ayuda de funciones de estructura. Sea x un punto en la atmósfera y $\phi(x)$ la fase donde las propiedades estadísticas no dependen de x . La función de estructura esta dada por la ecuación (3.4):

$$D_\phi(r) = \left\langle [\phi(x+r) - \phi(x)]^2 \right\rangle = 6.88 \left(\frac{r}{r_0} \right)^{5/3}. \quad (3.4)$$

Por lo tanto dimensionalmente vemos que la fase ϕ va como $r_0^{-5/6}$.

El factor para escalar las pantallas de fase ϕ se relaciona directamente con la función de estructura^[11] quedando la razón:

$$\left(\frac{r_0 \text{ original}}{r_0 \text{ nuevo}} \right)^{\frac{5}{6}} = \text{factor de escala}$$

Para escalar el mapa de fase solamente se multiplica por el factor de escala:

1. Fase (i, j) * factor de escala = nueva fase (i, j)

PANTALLAS DE AMPLITUD Y FASE ESCALADAS DE $r_0=10$ cm a $r_0=20$ cm

El factor de escala de $r_0=10$ cm a $r_0=20$ cm es

$$\left(\frac{10\text{cm}}{20\text{cm}} \right)^{\frac{5}{6}} = 0.56$$

Para escalar la amplitud se puede hacer un análisis semejante al anterior pero considerando que hay una relación entre la intensidad luminosa y la amplitud. Además se tienen que tomar en cuenta los siguientes puntos

1. Se realiza un promedio dentro de la pupila 1.
2. Amplitud(i, j)- promedio= fluctuación (Se le resta el promedio a la amplitud en cada píxel (i, j) quedando sólo la fluctuación).
3. Fluctuación * factor de escala = nueva fluctuación.
4. Nueva fluctuación + 1 (offset o pupila) = nueva amplitud

La información que nos interesa para los cálculos del espectro de potencia es la fase, por lo tanto no ha sido necesario escalar la amplitud. Si se hacen estudios del centelleo producidos por el cambio en la intensidad sería necesario hacerlo.

FWHM teórico

Para $r_0 = (\lambda=0.5\mu\text{m}) = 20$ cm

$$FWHM = 0.98 \frac{\lambda}{r_0} = 0.98 \frac{0.5\mu\text{m}}{20\text{cm}} = 2.5 \times 10^{-6} \text{ rad}$$

$$(2.5 \times 10^{-6} \text{ rad}) \times 206265 = 0.52''$$

FWHM calculado 22.63 píxeles

Seeing teórico para $r_0(\lambda=0.5\mu\text{m})=20$ cm $\epsilon=0.52$ segundos de arco

Seeing calculado para $r_0(\lambda=0.5\mu\text{m})=20$ cm $\epsilon=0.45$ segundos de arco

Al utilizar el procedimiento para escalar la amplitud y la fase de las pantallas generadas previamente por TurbuLenZ04 (para un $r_0=10$ cm), se obtuvieron nuevas pantallas con las características correspondientes al factor de escala, es decir al nuevo valor de $r_0=20$ cm. Los resultados fueron satisfactorios, pues la información estadística es idéntica a la de las pantallas con $r_0=20$ cm generadas directamente con TurbuLenZ04. Véanse Figura 3.9 y Figura 3.10. El beneficio directo de dicho procedimiento es ahorro de tiempo y facilidad para generar miles de pantallas de fase y de amplitud a partir de las ya existentes y con cualquier r_0 .

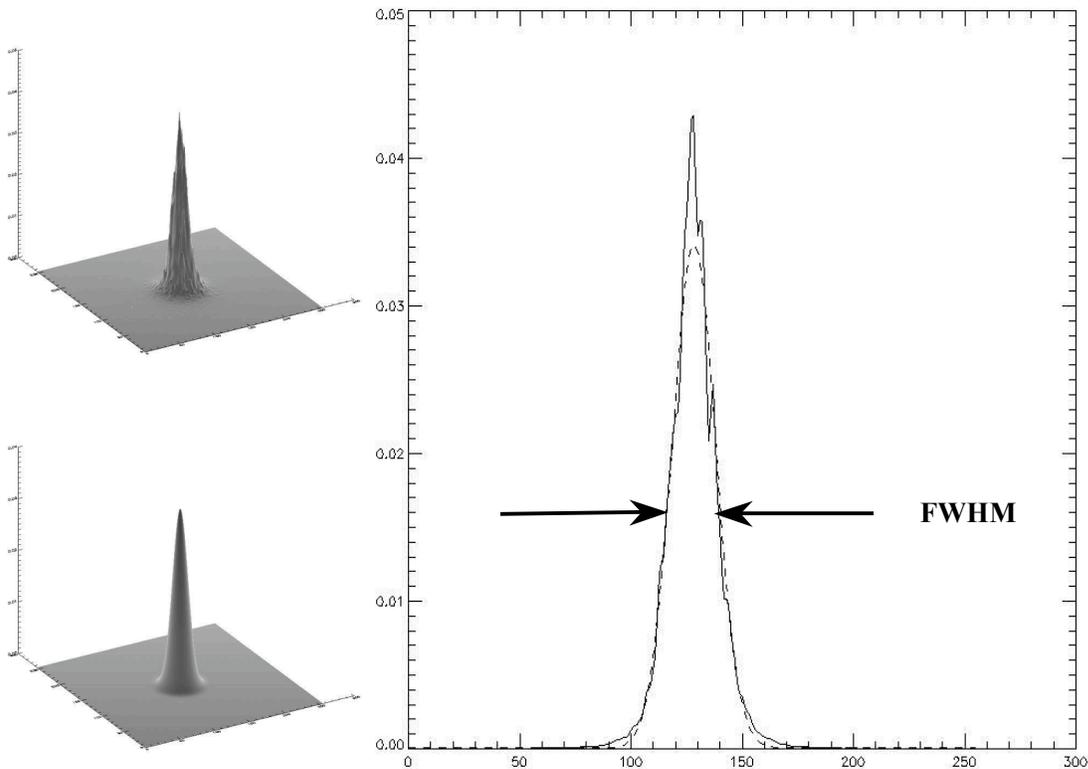


Figura 3.10. Izquierda arriba: imagen integrada. Izquierda abajo: imagen integrada ajustada a una gaussiana. Derecha: Ancho a media altura (FWHM) de la imagen integrada con un r_0 escalado de 20 cm; escala del píxel en el plano imagen de 0.020 segundos de arco.

Con lo anterior confirmamos que tenemos la capacidad de simular pantallas de fase y de amplitud con la estadística correcta (Kolmogorov). Posteriormente a dichas pantallas se les aplicarán los programas de caracterización codificados en IDL (CÁLCULO_FWHM y POWER_SPECTRUM&r0). Este procedimiento servirá como verificación y calibración de dichas rutinas de análisis antes de utilizarlas para caracterizar las pantallas de fase generadas en laboratorio.

CAPÍTULO 4 GENERACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE PANTALLAS DE FASE EN LABORATORIO

Las etapas de construcción de un simulador de turbulencia atmosférica son:

1. Generación y caracterización de pantallas de fase con la estadística correcta (Kolmogorov).
2. Diseño opto-mecánico y desarrollo de la electrónica de control.
3. Montaje o implementación física.

Dentro de los alcances de este trabajo nos ocuparemos de la primera parte de la construcción del simulador de turbulencia atmosférica que consiste en generar y caracterizar las pantallas de fase en laboratorio.

La fabricación de pantallas de fase se realizó en el laboratorio de usos múltiples del IA-UNAM. El reto: generar pantallas de fase que simulen el comportamiento de las capas turbulentas de la atmósfera con una distribución estadística que corresponda a la variación del índice de refracción, es decir, el espectro de potencias de la turbulencia óptica, descrita por Kolmogorov. La caracterización de las pantallas de fase se llevó a cabo en el laboratorio de óptica del IA-UNAM y posteriormente se realizó el análisis de dichas mediciones mediante código de programas desarrollado por nosotros.

4.1 GENERACIÓN DE PANTALLAS DE FASE EN LABORATORIO

Para generar cualquier tipo de pantalla de fase nos propusimos utilizar un sustrato óptico homogéneo (transparente a la longitud de onda con la que se trabaja -si se trabaja en transmisión- aunque también puede ocuparse un

material reflejante). Una cualidad deseable para que el sustrato no influya en las mediciones es que éste sea de superficies planas y paralelas. Como se verá más adelante, si la superficie del sustrato no es completamente plana, este hecho podría ser de utilidad para simular las bajas frecuencias espaciales (tip/tilt) del comportamiento de la atmósfera turbulenta.

Es importante recalcar que la fabricación de las pantallas de fase no es trivial y que existen factores limitantes que hacen de la fabricación un proceso delicado y complicado. Es necesario tener muy presente la limpieza y el orden en el área de trabajo indispensable para fabricar las pantallas de fase y la metodología de fabricación según la técnica escogida (ver Apéndice B).

La primera técnica que escogimos para fabricar las pantallas de fase fue la de aplicación de múltiples capas de acrilatos; la segunda fue la obtención de pantallas de fase utilizando un sustrato acrílico.

4.1.1 Generación de pantallas de fase con múltiples capas de acrilatos

En principio el método que se escogió para fabricar las pantallas de fase en laboratorio es el descrito en el artículo “*A Simple Turbulence Generator for Adaptive Optics*” por Sandrine Thomas^[21] donde propone la aplicación de múltiples capas acrilatos sobre vidrios (laca en aerosol para cabello). Con este método las pantallas de fase trabajan bajo el principio de transmisión y la evolución temporal de la turbulencia óptica se simula con desplazamiento o giro del plato o pantalla de fase.

El material del sustrato elegido para realizar las pantallas de fase fue vidrio plano de ventana (de 3 mm de espesor), conocido como *vidrio flotado*, que debe su nombre a la técnica de fabricación. La técnica consiste en colocar el vidrio aún caliente sobre una cama de metal líquido (una combinación de mercurio y estaño), mientras el vidrio flota en la superficie plana del metal líquido, se enfría y toma la forma plana de dicha superficie. El vidrio obtenido tiene un bajo costo y es de fácil manejo; además, sus características como su índice de refracción suficientemente homogéneo y superficies paralelas y planas, satisfacen las necesidades del proyecto. Si el material no es homogéneo entonces introducirá variaciones en el frente de onda debidas a los cambios del índice de refracción dadas las irregularidades en la distribución del material.

Es conveniente en todo caso hacer mediciones a los vidrios sin laca para observar su estructura y en una etapa posterior poder establecer la diferencia entre los efectos del método elegido para generar la pantalla de fase y los aportados por el propio vidrio, comparando la información obtenida con el vidrio limpio y la obtenida con la pantalla de fase. Es decir concluir si influye el material del sustrato para obtener los efectos deseados. Ver Figura 4.1.

Realizamos varias pruebas de aplicación de acrilatos en vidrios de 4cm x 4cm de lado y cortados circularmente de 8 cm de diámetro para aproximarnos a una metodología idónea de generación de pantallas de fase. Las pruebas se hicieron con distintas marcas de laca para cabello en cuya fórmula se incluyen los acrilatos. En la Figura 4.2 se muestra el ejemplo de una pantalla de fase obtenida con la aplicación de múltiples capas de acrilatos.

Se observó que no todas las metodologías de aplicación fueron adecuadas para el objetivo perseguido. Se estableció un protocolo para describir las condiciones y procedimiento de generación de pantallas de fase que se puede consultar en el Apéndice B. Así pues, encontramos que la mejor forma de aplicación de laca si se realiza a mano es a una altura de separación entre el aplicador (aerosol) y la superficie de 8 a 10 cm con un movimiento constante y rápido para evitar escurrimientos, asegurándonos de que la superficie del vidrio estuviese totalmente horizontal. Deben evitarse los escurrimientos y la aplicación excesiva de laca; la laca eventualmente escurre hacia los lugares más bajos lo que produciría una capa más gruesa en esos lugares. La aplicación excesiva de laca impediría incluso la transmisión del haz de luz (láser He-Ne) que se utiliza en el interferómetro. Esto es debido a que las franjas de interferencia que se forman están demasiado juntas, además es posible que el algoritmo del interferómetro ya no sea capaz de resolverlas o bien el sistema de adquisición no las percibe. También hay que tomar en cuenta el efecto de borde porque la laca tiene tendencia a concentrarse en las orillas del sustrato.

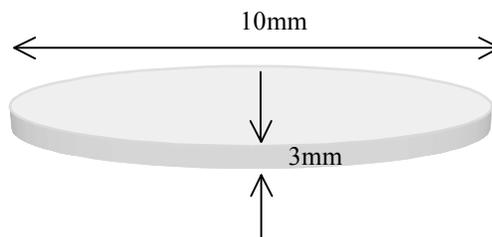


Figura 4.1. Esquema de una pantalla de fase.

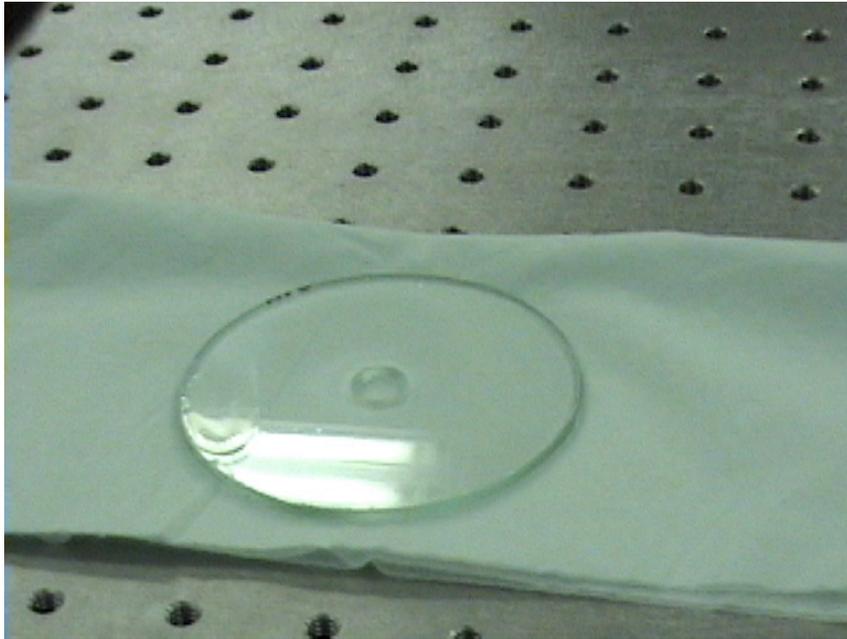


Figura 4.2. Pantalla de fase de con múltiples capas de acrilatos aplicadas sobre vidrio. La pantalla fue realizada en el IA-UNAM.

Se debe tener cuidado de no hacer una aplicación con movimientos demasiado rápidos porque la capa de laca que se obtendrá no será homogénea. Preferentemente la aplicación debe comenzar a unos cuantos centímetros por fuera del perímetro del vidrio para lograr una mejor distribución de ésta. Es recomendable una altura de aplicación no mayor a 10 cm para evitar que las partículas de laca lleguen pulverizadas al vidrio porque en este estado ya no es posible la unión con las partículas que llegan aún frescas a la superficie y no se formará una película uniforme. Lo anterior ocasiona que la transmisión del haz no sea uniforme en toda la superficie, es decir, que sea defectuosa. Tampoco es posible lograr una capa uniforme cuando la laca se aplica muy cerca del vidrio debido a que en su forma líquida la laca sale disparada hacia un solo punto de la superficie estrellándose contra el vidrio produciendo escurrimientos por lo que se sugiere una altura no menor a 8 cm.

El área de la superficie útil puede variar dependiendo de los requerimientos y necesidades del sistema. Se realizaron medidas con placas de vidrio a las que posteriormente se les perforó en el centro para poder montarlas en el sistema óptico. Las placas perforadas fueron medidas para verificar si la perforación había introducido tensiones en el vidrio que produjeran cambios en el resultado. Después de la perforación no se reportaron alteraciones significativas en los vidrios.

Al aplicar múltiples capas de acrilatos es necesario dejar secar entre cada aplicación para obtener mejores resultados. Se probaron diferentes métodos de secado como: secado con horno de microondas, calor de una lámpara con foco de 100 Watts o secado al aire libre, notando que el método de secado no influye en el resultado final medido.

4.1.2 Generación de Pantallas de fase con material acrílico

Otra propuesta fue realizar pantallas de fase con material acrílico (material del que están hechas las cajas comunes de discos compactos). Dicha técnica resultó ser más manejable que la primera. Trabaja en transmisión (igual que las pantallas de fase con múltiples capas de acrilatos). La evolución temporal de la turbulencia se puede simular mediante el desplazamiento o giro de la pantalla de fase frente a la fuente de luz (laser o luz blanca). Con esta técnica se encontraron menos dificultades en la fabricación y fue posible hacer la caracterización final de las pantallas de fase.

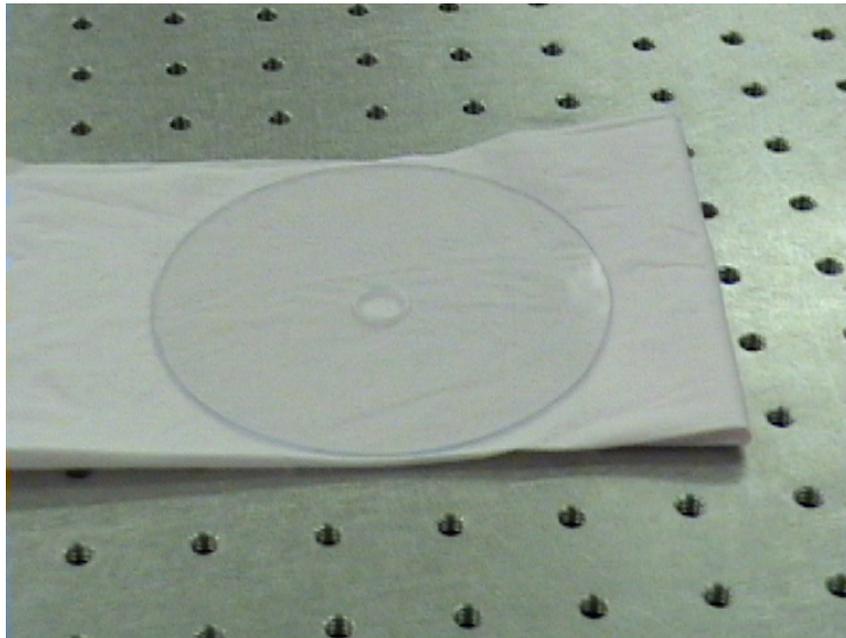


Figura 4.3. Pantalla de fase de material acrílico realizada en el IA-UNAM.

Por medio de un análisis cualitativo se infirió que esta técnica podría ser una alternativa viable para ser utilizada en el simulador. Al observar el acrílico limpio, con luz natural era posible observar franjas de interferencia, así que decidimos realizar las mediciones interferométricas. En primera instancia se realizaron mediciones con 20 pantallas de fase de acrílico de 3 mm de espesor como la que se

muestra en la Figura 4.3. Posteriormente se recortaron 2 de ellas en forma circular con diferentes diámetros, una de ellas con una perforación en el centro para tomar en cuenta las posibles tensiones que pudieran provocar los cortes. Se encontró que los cortes no introducen tensiones importantes que afecten las mediciones con el material acrílico.

4.2 CARACTERIZACIÓN DE PANTALLAS DE FASE EN LABORATORIO

El proceso de caracterización consiste en medir en laboratorio con un montaje óptico las características de las superficies de las pantallas de fase y posteriormente analizar dichas mediciones. En primera instancia el análisis puede ser cualitativo, de tal manera que en caso de necesitar un balance rápido resulta muy útil. Para dicho análisis utilizamos los datos del programa MetroPro del interferómetro ZYGO en los que se calculan valores pico-valle: PV, Root Mean-Squared: RMS, en zonas que nosotros podemos definir escogiendo el tamaño, la forma y la ubicación. También podemos obtener los polinomios de Zernike y el espectro de potencias, además de controlar algunos otros parámetros. Para tener mayor certeza en la conclusión sobre el estado de la superficie, los datos se analizan mediante los programas que desarrollamos previamente en IDL. Los programas calculan el diámetro de Fried por medio del espectro de potencias de la pantalla de fase medida.

4.2.1 Montaje Óptico

En la Figura 4.4 se muestra el esquema del montaje que consta de: (1) interferómetro ZYGO GPI-HS colocado sobre una (2) mesa óptica, (3) filtro (para aumentar el contraste de las imágenes), (4) pantalla de fase y (5) soporte de 5 ejes.

Para estas pruebas se utilizó un (6) espejo plano a $\frac{\lambda}{20}$ como referencia en un extremo del montaje, colocado en un (7) soporte de 3 ejes. En la Figura 4.5 se muestra la fotografía del montaje óptico utilizado para realizar las mediciones.

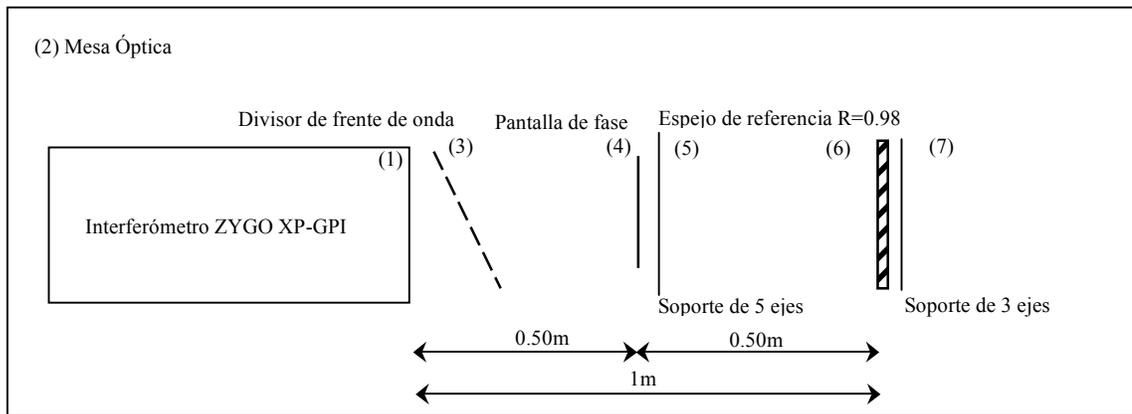


Figura 4.4. Esquema del montaje óptico.

Para realizar las mediciones del mapa de fase y a partir de estos datos caracterizar las pantallas de fase fue necesario establecer condiciones y cierta metodología. Sugerimos seguir el protocolo descrito en el Apéndice B para la medición de cada una de las pantallas con el fin de que las mediciones de fase sean repetibles y fáciles de obtener nuevamente. Las mediciones se obtienen directamente del programa MetroPro del interferómetro ZYGO GPI-HS y también de los archivos en formato ASCII correspondientes a cada medición, procesados en IDL.

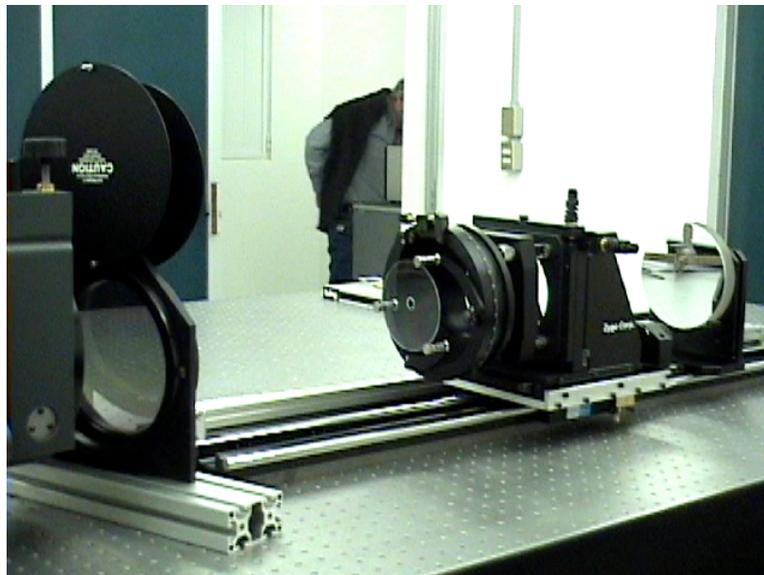


Figura 4.5. Fotografía del Montaje óptico.

Debido al arreglo utilizado la diferencia de camino óptico δ es dos veces la distancia entre la referencia y el espejo, es decir dos metros, distancia mínima de coherencia que debe tener el láser que se utilice, el láser He-Ne con una longitud de onda $\lambda=633\text{nm}$ del interferómetro tiene una longitud de coherencia mayor de dos metros^[27].

El espejo de referencia esta montado en un soporte de tres ejes que cuenta con unos tornillos que lo inclinan para obtener un “campo plano” es decir ver una sola franja, de este modo de acuerdo con la teoría (si cambiamos el camino óptico de $\Delta\delta=\lambda$, la diferencia de fase queda igual ya que es de periodo 2π) al poner la pantalla de fase, las franjas de interferencia se deberán únicamente a esta última. Cuando la superficie es perfectamente plana las franjas son rectas.

El coeficiente de reflexión del espejo plano de referencia es del 98% de la luz recibida (un 60% de la luz que emite el láser). El 40% restante se usa para la referencia dentro del interferómetro. Aunque existiera interferencia los niveles de amplitud no son comparables (intensidad) y no se percibe la interferencia. Por ello se introduce un divisor de haz a la salida del láser con el fin de aumentar el contraste y tener intensidades comparables para obtener patrones de interferencia.

4.2.2 Mediciones de pantallas de fase en laboratorio

Las mediciones se llevaron a cabo en el laboratorio de óptica del IA-UNAM. En el montaje óptico se utilizó el interferómetro ZYGO modelo GPI-HS (cuyo funcionamiento se describe en el Apéndice C) manipulado mediante el software MetroPro, desde una computadora de uso exclusivo.

La primera etapa de la caracterización de las pantallas de fase consistió en hacer mediciones de la superficie (sustrato óptico) del vidrio sin laca, luego con laca y posteriormente realizar mediciones de las superficies de material acrílico (de cajas de CD) a las cuales no se les aplicó laca. La segunda consiste en analizar los datos adquiridos para obtener las características de fase del frente de onda.

Es posible hacer un análisis cualitativo de las mediciones si se observan las líneas del interferograma obtenido. Si están muy deformadas o curvadas significa que la superficie es poco plana y que posiblemente sea útil para simular la turbulencia óptica. A simple vista se puede observar en la pantalla que despliega el software MetroPro si la información de fase de la superficie medida está completa, de este modo podemos descartar aquellas pantallas de fase de las que se tiene poca información o información limitada por problemas en la transmisión óptica.

Las mediciones realizadas en el interferómetro se despliegan mediante el software MetroPro y se obtienen valores RMS y PV que nos dan una idea inicial de las características de la superficie. En las mediciones que se realizaron se sustrajo el “Pistón” y el “Tip-Tilt”. El análisis cuantitativo de las superficies puede hacerse mediante un balance entre los valores RMS y PV, dados en unidades de longitud de

onda (λ). El análisis más detallado lo hicimos mediante las rutinas programadas por nosotros en IDL.

Valores RMS (Root Mean Square) y PV (peak to valley)

Recordemos que el RMS es la desviación de la raíz cuadrada del promedio de los valores cuadráticos de la línea central. Es un método para calcular un promedio elevando al cuadrado cada valor y después tomando la raíz cuadrada de la media de los valores. La línea del centro se define como el mejor ajuste de la superficie seleccionada,

$$rms = \left(\frac{y_1^2 + y_2^2 + y_3^2 + \dots + y_N^2}{N} \right)^{1/2} \quad (4.1)$$

Donde: y_x son elementos de peso a lo largo del perfil y N es el número de elementos discretos.

El resultado del RMS se calcula como la desviación estándar de la altura o profundidad de la superficie de prueba relativa a la referencia a todos los puntos del conjunto de datos. Dado que el RMS es un parámetro de rugosidad, la figura de superficie debería quitarse de los datos con el control llamado *Remove control* para que el resultado sea mucho mejor.

El RMS es la raíz cuadrada del valor cuadrático medio de la figura de error de la superficie o del el error relativo transmitido a una superficie de referencia. El RMS es un área pesada estadísticamente: cuando se utiliza para componentes ópticos, describe más adecuadamente el desempeño de la superficie medida que la estadística PV porque utiliza todos los datos en el cálculo.

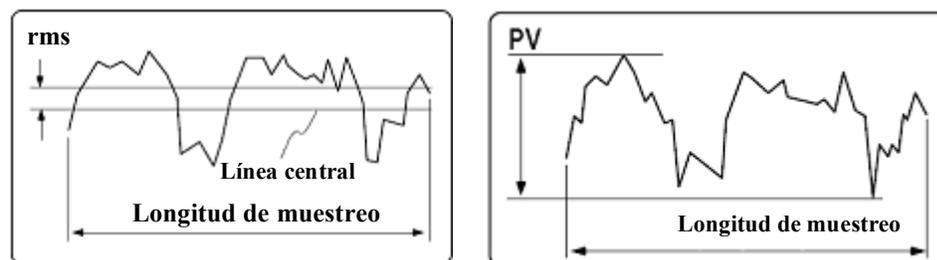


Figura 4.6. Izquierda: Detalle del valor RMS de una superficie. Derecha: Detalle del valor PV de una superficie.

Por otro lado, el valor PV es la distancia entre los picos más bajos y más altos dentro del muestreo. PV se conoce también como R_t . Cuando se utiliza para cuantificar la rugosidad el valor PV es la altura máxima de la rugosidad, es decir, que tan pronunciada es. El valor PV es el peor caso de error punto a punto en el conjunto de datos. El PV compara los dos puntos más extremos en la superficie; entonces es posible que para dos superficies muy diferentes el valor PV sea el mismo. En la Figura 4.7 se observa que para diferentes superficies es posible tener un mismo valor PV; se muestran los cortes laterales de tres superficies distintas.

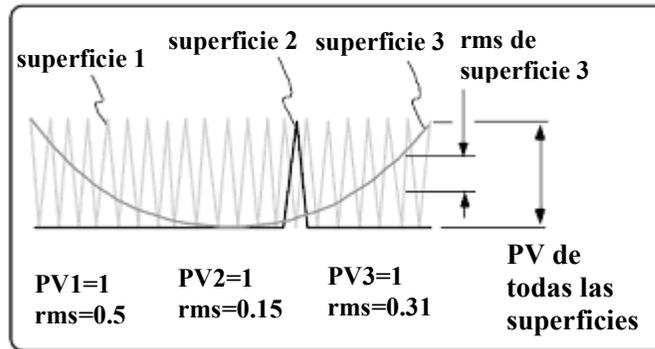


Figura 4.7. Ejemplo de tres superficies distintas con el mismo valor PV y diferentes valores de RMS.

Mediciones de las pantallas de fase con múltiples capas de acrilatos

Anteriormente se mencionó que las mediciones de las pantallas de fase se llevaron a cabo en el laboratorio de óptica del IA-UNAM. Se realizaron diversas pruebas y mediciones.

Al realizar las mediciones de los vidrios con múltiples capas de acrilatos hubo pérdida de información debido a la técnica de aplicación de la laca. Observamos un comportamiento peculiar, la transmisión de la pantalla de fase varía al cambiar la orientación espacial de ésta. Probablemente se deba a que las partículas de laca se “alinean” de tal manera que en una posición o ángulo permiten el paso del haz de luz y en otro no. Como resultado de la aplicación de acrilatos se obtuvieron pantallas de fase defectuosas o con muchos puntos sin información. En la Figura 4.8 se muestra una pantalla de fase antes de la aplicación de acrilatos. La misma pantalla de fase pero con aplicación de acrilatos en la Figura 4.9.

Según el criterio descrito para valorar la calidad de la superficie el valor PV no brinda mucha información de toda la superficie, aunque sí da el peor caso punto a punto. El valor RMS da información de todos los puntos de la superficie.

Al analizar los valores RMS observamos que el vidrio utilizado es bastante plano.

Después de aplicar las capas de acrilatos aumenta el valor RMS, por lo que podemos concluir que la rugosidad es aportada por la aplicación de los acrilatos. Compárense valores de las pantallas 5, 6 y 7 de la Tabla 4.1 y Tabla 4.2. (En las tablas sólo se muestran las mediciones finales).

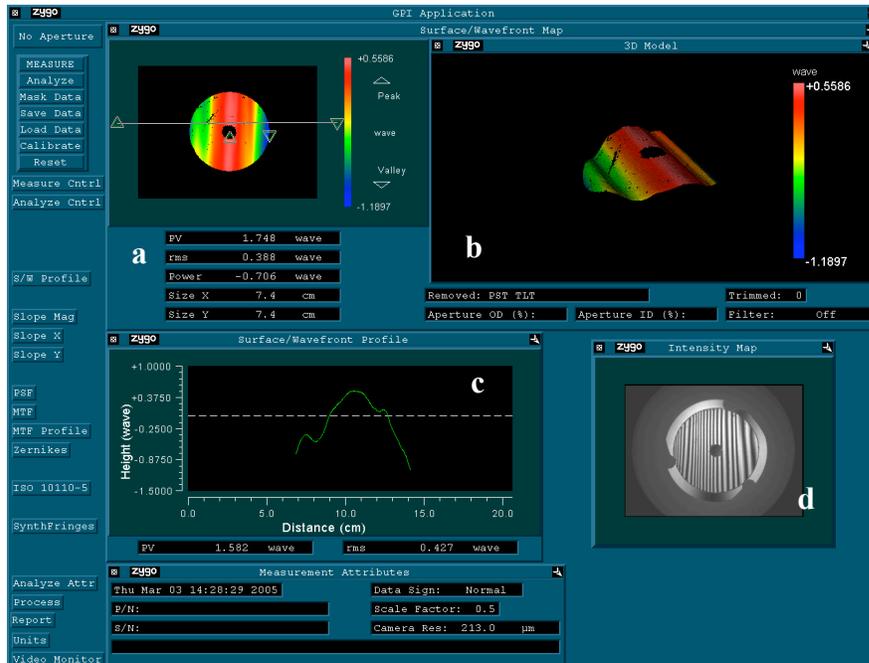


Figura 4.8. Ejemplo de medición de pantalla de fase sin acrilatos utilizando MetroPro. a) valores RMS, PV. b) superficie medida (en longitudes de onda). c) corte de la superficie medida. d) imagen de intensidad del interferograma.

Los interferogramas y mapas de fase obtenidos con esta técnica no proporcionan información suficiente para la caracterización de las pantallas de fase. En la Tabla 4.1 se muestran las mediciones de los vidrios sin acrilatos. Comparando dichas mediciones con las obtenidas con las pantallas de fase con acrilatos (Tabla 4.2) se observan los efectos que aportan las capas de acrilatos. La técnica produce un efecto de “rugosidad” en la superficie. Los mediciones que se muestran en las columnas PV (100%) y RMS (100%) indican que toda la superficie de la pantalla de fase fue medida; las columnas que muestran un PV (25%) y RMS (25%) indican que la superficie medida fue del 25% de la superficie total. Usualmente se utilizaba la zona central o donde se tuviera más información (ver Figura 4.10).

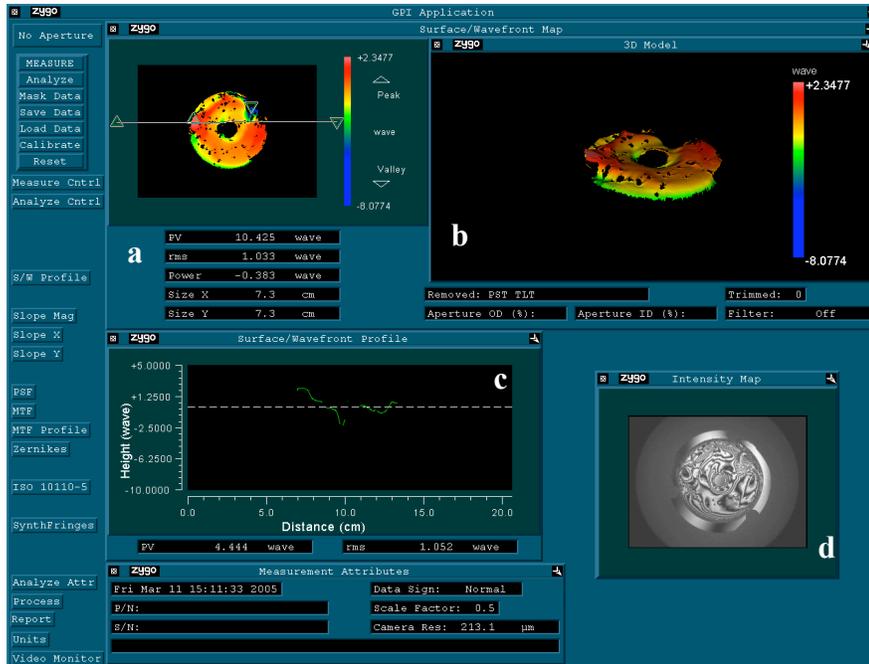


Figura 4.9. Ejemplo de medición de pantalla de fase con acrilatos utilizando MetroPro. a) valores RMS, PV. b) superficie medida (en longitudes de onda). c) corte de la superficie medida. d) imagen de intensidad del interferograma.

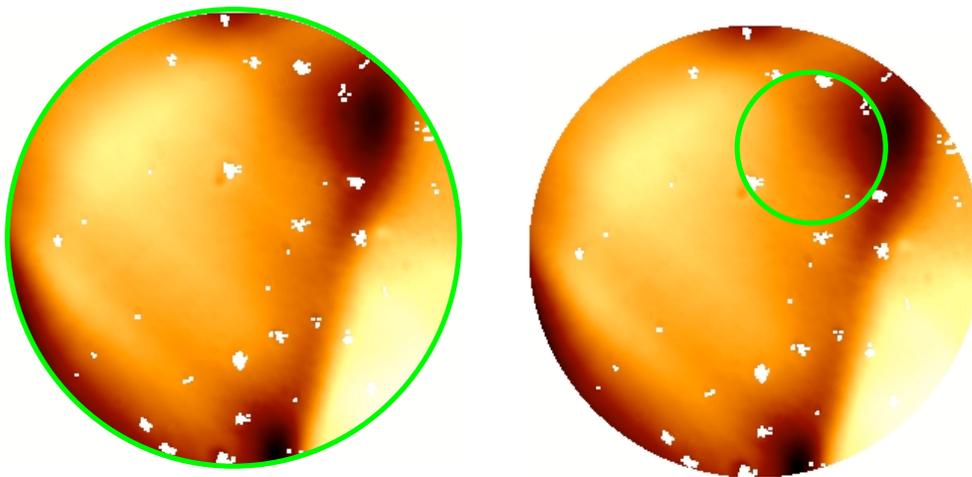


Figura 4.10. Izquierda. 100% de la superficie de la pantalla de fase. Derecha 25% de la superficie de la pantalla de fase. La circunferencia muestra el porcentaje de la superficie medida.

Vidrio 1/8. 8cmφ sin laca	PV (100 %) λ=HeNe	RMS (100%) λ=HeNe	PV (25%) λ=HeNe	RMS (25%) λ=HeNe
1	1.35	0.221	0.171	0.037
2	1.827	0.407	0.267	0.063
3	1.944	0.459	0.184	0.043
4	--	--	0.1687	0.036
5	0.427	0.091	0.148	0.027
6	1.715	0.302	0.139	0.022
7	0.479	0.116	0.164	0.018
8	0.622	0.108	0.270	0.058
9	0.208	0.144	0.077	0.011
10	0.436	0.085	0.183	0.030

Tabla 4.1. Mediciones realizadas al sustrato de vidrio en el laboratorio con el interferómetro ZYGO.

Vidrio 1/8. 8cmφ con laca	PV (100 %) λ=HeNe	RMS (100%) λ=HeNe
5	3.509	0.458
6	2.089	0.356
7	1.972	0.222

Tabla 4.2. Mediciones realizadas a las pantallas de fase con aplicación de acrilatos con el interferómetro ZYGO.

Mediciones de las pantallas de fase de acrílico

Se realizaron pruebas a treinta muestras de material acrílico de las que solamente tres tapas no sirvieron por rayaduras y suciedad. Los valores pico-valle e imágenes de fase fueron alentadoras.

En la Figura 4.11 y en la Figura 4.12 que muestran el interferograma de dos pantallas de fase de acrílico, también se observa un patrón oscuro muy similar al que se presenta en todas las muestras. Creemos que dicho patrón es una franja de interferencia debido a las caras no paralelas y no planas del material acrílico que introduce una pequeña diferencia de camino óptico de la luz que pasa a través de ella que se aprecia como un patrón oscuro en la imagen de intensidad del interferograma mismo que aparece en la fase.

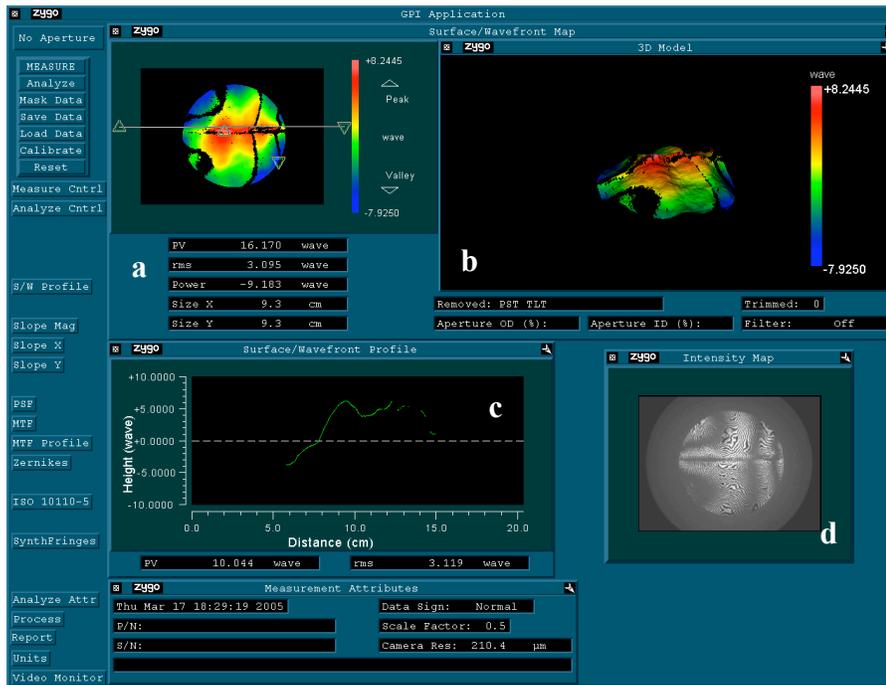


Figura 4.11. Ejemplo de medición de pantalla de fase 11 de acrílico utilizando MetroPro. a) valores RMS, PV. b) superficie medida (en longitudes de onda). c) corte de la superficie medida. d) imagen de intensidad del interferograma.

Los valores RMS obtenidos en las pantallas de fase de material acrílico fueron mayores que los obtenidos en las pantallas de fase con múltiples capas de acrílicos lo cual nos indica que la superficie del acrílico es menos plana que la del vidrio.

Después de realizar las mediciones en el interferómetro ZYGO y para su posterior análisis, se guardan los datos en formato ASCII. Posteriormente se leen en un programa desarrollado en IDL para obtener nuevamente la información tomada en el interferómetro y poder trabajar con ella directamente y poder realizar distintos cálculos para obtener las características de cada pantalla de fase.

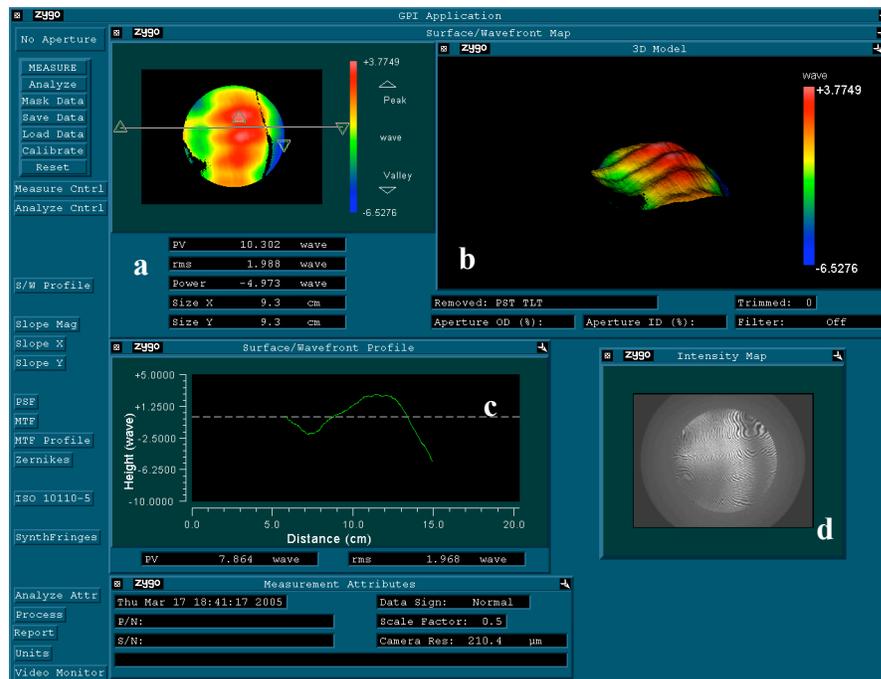


Figura 4.12. Ejemplo de medición de pantalla de fase 19 de acrílico utilizando MetroPro. a) valores RMS, PV. b) superficie medida (en longitudes de onda). c) corte de la superficie medida. d) imagen de intensidad del interferograma.

Acrílico 1/8". 10cmφ sin laca	PV (100 %) λ=HeNe	RMS (100%) λ=HeNe
1	17.848	2.349
2	3.902	2.552
3	12.430	2.179
4	14.152	2.656
5	11.580	1.888
6	13.725	2.673
7	12.026	2.120
8	13.908	2.560
9	10.635	1.791
10	13.979	2.677
11	16.170	3.095
11 circ*	15.486	2.771
12	14.693	2.420
13	15.970	2.552
14	14.023	2.593
15	12.641	2.109
16	13.613	2.587
17	15.641	2.472
18	13.829	2.517
19	8.967	1.505
19 circ**	7.333	1.323
20	10.302	1.988
21	13.183	1.714
22	14.482	2.555
23	7.216	1.206
24	6.588	1.099

Tabla 4.3. Mediciones de Pantallas de fase de acrílico.

4.2.3 Uso de rutinas en IDL para la caracterización

Otra forma de conocer las características de las superficies en cuestión es analizar los datos (archivos ASCII del interferograma y mapa de fase) obtenidos de las mediciones. Con el fin hacer una caracterización más detallada, el análisis lo hicimos mediante las rutinas programadas en IDL y en términos de la estadística del r_0 . Los programas que empleamos para el cálculo del diámetro de Fried y del espectro de potencia son: **LEE_ASCII_ZYGO**, **CÁLCULO_FWHM**, **POWER_SPECTRUM&r₀** y **PS&r₀_PUPILA**.

Uno de los programas desarrollados durante este trabajo y de importancia fundamental para alcanzar el objetivo perseguido es el que calcula el valor

* El material acrílico fue recortado en forma circular con una perforación al centro.

** El material acrílico fue recortado en forma circular.

estadístico de r_0 . El programa calcula el valor de r_0 bajo el principio de turbulencia tipo Kolmogorov utilizando el espectro de potencia.

Para verificar que la rutina **POWER_SPECTRUM**& r_0 hace un cálculo correcto, utilizamos información conocida (obtenida de las pantallas de fase generadas numéricamente por TurbuLenZ), es decir, el valor estadístico del diámetro de Fried. Se comparan estos valores con los resultados arrojados por **POWER_SPECTRUM**& r_0 comprobando que las simulaciones hechas con TurbuLenZ son correctas y que el programa que calcula el valor de r_0 también funciona correctamente.

Para la calibración del programa fue preciso el análisis de las dimensiones de las variables físicas que intervienen en el cálculo tanto del espectro de potencia como del diámetro de Fried. El análisis es fundamental para el buen entendimiento e interpretación de mediciones y resultados. Los resultados finales se encuentran en la última parte de este capítulo.

Análisis Dimensional del Espectro de Potencia

Se realizó un análisis mediante el espectro de potencia, con el objeto de calibrar el programa que calcula el diámetro de Fried (r_0), para llevar a cabo la caracterización de las pantallas de fase. Para este fin, se utiliza una calibración dimensional mediante factores de escala que permiten tener las unidades adecuadas que se mostrarán a continuación.

Se tiene que el r_0 o diámetro de Fried, característico de cada pantalla, se puede obtener en función de la frecuencia espacial a través del espectro de potencia de las pantallas de fase por medio de:

$$W(f) = 0.0228 * r_0^{-5/3} f^{-11/3} \quad (4.2)$$

Donde f es la frecuencia espacial. Adicionalmente, el espectro de potencia $W(f)$ se relaciona con la diferencia de camino óptico OPD δ (por sus siglas en inglés) mediante:

$$W(f) = \alpha * r_0^{-5/3} \left\langle \left| FFT(\delta) \right|^2 \right\rangle * (2\pi / \lambda)^2, \quad (4.3)$$

donde FFT es la Transformada rápida de Fourier, $\left\langle \left| \right|^2 \right\rangle$ es la energía espectral y α es el coeficiente que convierte la energía espectral en espectro de potencia, donde N es el número total de píxeles en la imagen y τ el tamaño de los píxeles. De las dos ecuaciones anteriores se obtiene r_0 como función de la frecuencia f

$$r_0(f) = \left[\frac{W(f)}{0.0228 * f^{-1/3}} \right]^{-3/5} \quad (4.4)$$

Es necesario introducir el coeficiente α dentro del cálculo del espectro de potencia $W(f)$ para obtener las dimensiones correctas de r_0 .

En la expresión $W(f) = 0.0228 * r_0^5 * f^{-1/3}$ que relaciona el espectro de potencia con r_0 :

La constante 0.0228 es adimensional

r_0 es el diámetro de Fried en unidades de longitud (metros)

f es la frecuencia espacial en 1/ unidades de longitud (metros)

$$W(f) = 0.0228 [1] * r_0 [L]^{5/3} f [L^{-1}]^{-1/3}, \quad (4.5)$$

$$W(f) [L^2] = 0.0228 [1] * r_0 [L]^{5/3} f [L^{-1}]^{-1/3}. \quad (4.6)$$

Como parte de la programación en IDL se realizó una rutina que calcula el espectro de potencia y el r_0 . Para obtener r_0 en función de la frecuencia espacial f , se generó una matriz cuadrada por medio de una función llamada *DIST*. Dicha función crea un arreglo en el cual el valor de cada elemento es proporcional a su frecuencia y su código se puede encontrar en el subdirectorio *lib* de IDL.

Los valores que arroja dicha función se encuentran en píxeles, por lo tanto, dentro de la rutina es necesario multiplicar por un factor de escala para convertir los píxeles a unidades de frecuencia espacial. El factor de escala (f. e.) es:

$$\text{f.e.} = \frac{1}{N\tau}, \quad (4.7)$$

donde

N es el número total de píxeles

τ es el tamaño del pixel

Utilizando la relación del espectro de potencia con el perfil de intensidad de turbulencia atmosférica:

$$W(f) [L^2] = 0.38 \lambda^{-2} f^{-1/3} C_n^2 dh, \quad (4.8)$$

del análisis dimensional resulta:

$$W(f) [L^2] = 0.38 [1] \lambda^{-2} [L]^2 f^{-11/3} [L]^{-11/3} C_n^2 [L^{-1/3}]^2 dh [L]. \quad (4.9)$$

Se comprueba que las unidades del espectro de potencia son m^2 si las unidades de longitud [L] son metros.

Por otro lado el análisis dimensional del espectro de potencia relacionado con el camino óptico OPD (δ) es:

$$W(f) = \alpha * r_0^{-5/3} \langle |FFT(\delta)| \rangle^2 * (2\pi / \lambda)^2, \quad (4.10)$$

$$W(f) [L^2] = \alpha [L] * r_0^{-5/3} [L]^{-5/3} \langle |FFT(\delta)| \rangle^2 [L]^2 * (2\pi / \lambda)^2 [L^{-1}]^2, \quad (4.11)$$

donde

$$\alpha = N * \tau^2$$

$N = N_i N_j$ es el número total de píxeles

$\tau = \Delta_i \Delta_j$ tamaño del píxel

Tomando en cuenta que el camino óptico δ está en unidades de longitud y que la FFT (Transformada rápida de Fourier) se lleva a cabo en dos dimensiones en una matriz de $N_i \times N_j$ con tamaño del píxel $\Delta_i \Delta_j$.

Si en lugar del camino óptico se toma la fase, sus unidades están dadas en radianes y por tanto es adimensional entonces el factor $2\pi/\lambda$ no es necesario, ya que este se utiliza para convertir a radianes el camino óptico

Finalmente del análisis dimensional de r_0 se obtiene:

$$r_0 = \left[\frac{W(f)}{0.0228 * f^{-11/3}} \right]^{-3/5}, \quad (4.12)$$

$$r_0 [L] = \left[\frac{W(f) [L^2]}{0.0228 [1] * f^{-11/3} [L^{-1}]^{-11/3}} \right]^{-3/5}. \quad (4.13)$$

Donde las unidades de longitud L son metros por lo tanto las unidades de r_0 son metros.

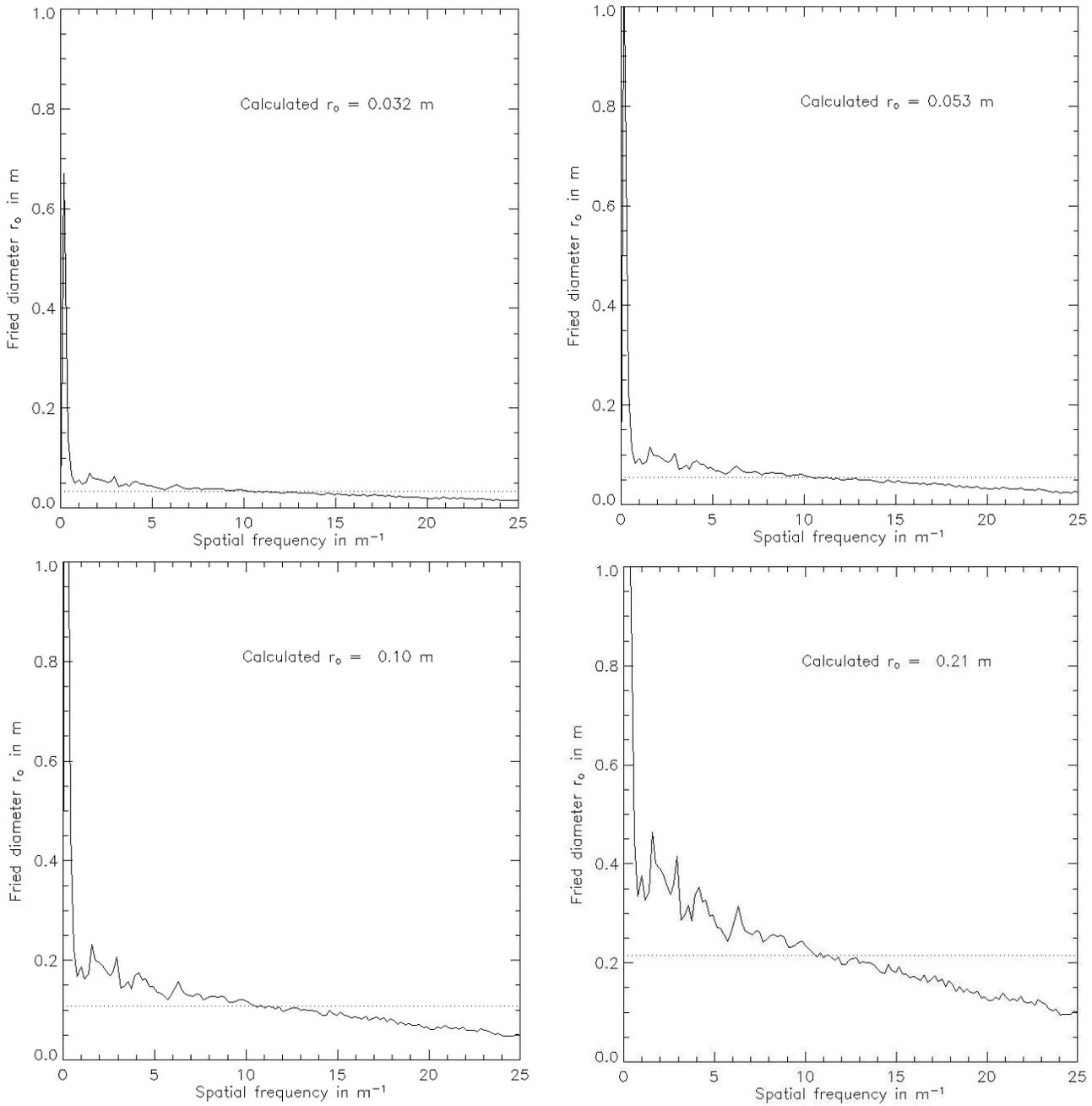


Figura 4.13. Resultados obtenidos con *POWER_SPECTRUM* & r_0 para pantallas de fase simuladas con diferentes valores de r_0 . De izquierda a derecha y de arriba hacia abajo: $r_0(\lambda=0.5\mu\text{m})=3\text{cm}$, $r_0(\lambda=0.5\mu\text{m})=5\text{cm}$, $r_0(\lambda=0.5\mu\text{m})=10\text{cm}$, $r_0(\lambda=0.5\mu\text{m})=20\text{cm}$. El r_0 promedio calculado se presenta arriba a la derecha de cada gráfica.

Para corroborar la rutina programada en IDL para el cálculo de r_0 se utilizaron los mapas de fase generados por TurbuLenZ y que sabíamos bien calibrados, obteniendo resultados muy satisfactorios que se muestran en la Figura 4.13.

Para las cuatro gráficas anteriores se obtuvieron valores de r_0 que corresponden a la estadística de los mapas de fase obtenidos numéricamente con anterioridad para el telescopio de 2.1m del OAN-SPM. La línea punteada indica el valor promedio del r_0 en toda la pupila. En este caso el tamaño de la pupila es de 105 píxeles que de acuerdo con la escala de píxel son 2.1m y posteriormente se obtuvo la calibración la frecuencia espacial.

Obtención de imágenes speckle y cálculo de su ancho a media altura (FWHM)

El análisis de los mapas de fase arrojados por el software MetroPro del interferómetro ZYGO se complica cuando hay demasiados “puntos negros”, es decir cuando falta información de intensidad. Existen dos razones para que la información se pierda: una de ellas es que durante la medición el haz del láser no se transmitió a través de la pantalla de fase y la otra es que la separación entre las franjas de interferencia resultantes es muy pequeña y el interferómetro no las detecta. Es necesario para fines de análisis y caracterización de las pantallas de fase, realizar interpolación o un filtrado de las frecuencias altas para tener información más completa. Se eligió la segunda opción para realizar el análisis. Se utilizó la rutina ***FILTRAFASES*** que se describe en el Apéndice A. Además al analizar los datos se deben eliminar los primeros coeficientes de Zernike “pistón” y “tip-tilt”.

Recordemos que para obtener la información de los mapas de fase generados numéricamente, se realizaron programas para calcular el ancho a media altura a partir una imagen integrada de imágenes instantáneas (con los programas ***CÁLCULO_FWHM*** y ***GEN_SPECKLES***, ***GEN_IMÁGENES*** respectivamente), para el posterior cálculo del espectro de potencia y del r_0 .

El análisis que hicimos para las pantallas de fase que fabricamos en laboratorio es similar al que llevamos a cabo con las pantallas de fase generadas numéricamente en el capítulo 3.

El diámetro del haz de entrada de acuerdo con los requerimientos del montaje óptico necesario (comunicación privada del Dr. Salvador Cuevas IA-UNAM ^{li>Error!No se encuentra el origen de la referencia.} para realizar las pruebas de Guieloa y SCIDARGM) que se utilizará para el tamaño de las subpupilas de las pantallas de fase fabricadas en laboratorio será de unos 20mm. De este modo se tomaron subpupilas de 20mm y se obtuvieron mediante los programas mencionados anteriormente múltiples imágenes instantáneas –variando la posición del centro de la subpupila-. Se sumaron todas las imágenes instantáneas obteniendo así una imagen integrada a la cual se le calculó el ancho a media altura (FWHM), que será equivalente a λ/r_0 .

Un ejemplo de una imagen instantánea y una imagen integrada se muestra en la Figura 4.14.

Para obtener una imagen integrada se simuló un arreglo con subpupilas de 2cm de diámetro aproximadamente recreando las mediciones que se harían en un montaje óptico real.

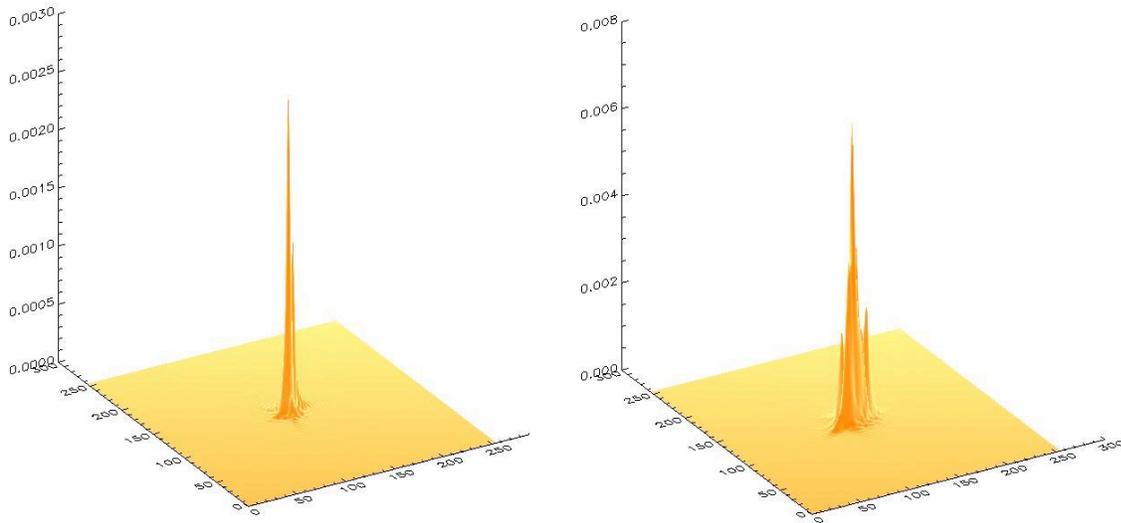


Figura 4.14. Izquierda: Imagen instantánea (con un tiempo de exposición de algunos milisegundos) obtenida a partir de una subpupila de una pantalla de fase de material acrílico. Derecha: Imagen integrada a partir de la suma de 20 imágenes instantáneas. La escala en el plano imagen es de 1.8 segundos de arco por píxel.

A partir del tamaño de la subpupila utilizada (20 mm), podemos obtener la escala de píxel en el plano imagen. Esta escala dependerá estrechamente de la calibración dimensional realizada con el interferómetro ZYGO (número de píxeles en una subpupila de una dimensión dada).

Haciendo el análisis con la pantalla de fase 19 circular de material acrílico, obtenemos:

La escala de píxel en el plano pupila es:

$$\frac{0.02m(\text{pupila})}{288.4 \times 10^{-6} m / \text{pix}} = 69 \text{ pix}(\text{pupila}),$$

$$L=256 \text{ pix (longitud lateral del plano de análisis)}(288.4 \times 10^{-10} \text{ m / pix}) \approx 7.4 \text{ cm} .$$

Muestreo en el plano imagen

$$\frac{\lambda}{(L)(\text{pix})} = \frac{0.6328 \mu\text{m}}{0.074 \text{ m}} = 8.55^{-8} \text{ rad / pix} = (8.55 \times 10^{-8}) (206265 \text{ "/pix}) = 1.76 \text{ "/pix}$$

La escala de píxel en el plano imagen es aproximadamente 1.8 "/pix

Por lo tanto si el FWHM que obtuvimos para la imagen integrada por 20 imágenes instantáneas es 15.28 pixeles tenemos $\frac{\lambda}{r_0} = 28.8''$.

FWHM calculado 16 píxeles

$$\lambda/r_0 = 28.8 \text{ segundos de arco}$$

De las ecuaciones (1.1) y (1.2) que corresponden al límite de difracción y al seeing respectivamente podemos obtener la relación D/r_0 . Recordemos que dicha relación es un parámetro que indica la “rugosidad del frente de onda” en una pupila de un determinado diámetro.

De la relación λ/r_0 podemos obtener:

$$r_0 = \frac{(0.6328 \times 10^{-6} \text{ m})(206265 \text{ rad})}{28.8''} = 4.5 \text{ mm} .$$

Conocemos el valor de $D=20\text{mm}$ entonces podemos obtener el valor de la relación D/r_0 con el cociente de λ/r_0 y λ/D .

$$\frac{D}{r_0} = \frac{0.02 \text{ m}}{0.0045 \text{ m}} = 4.4$$

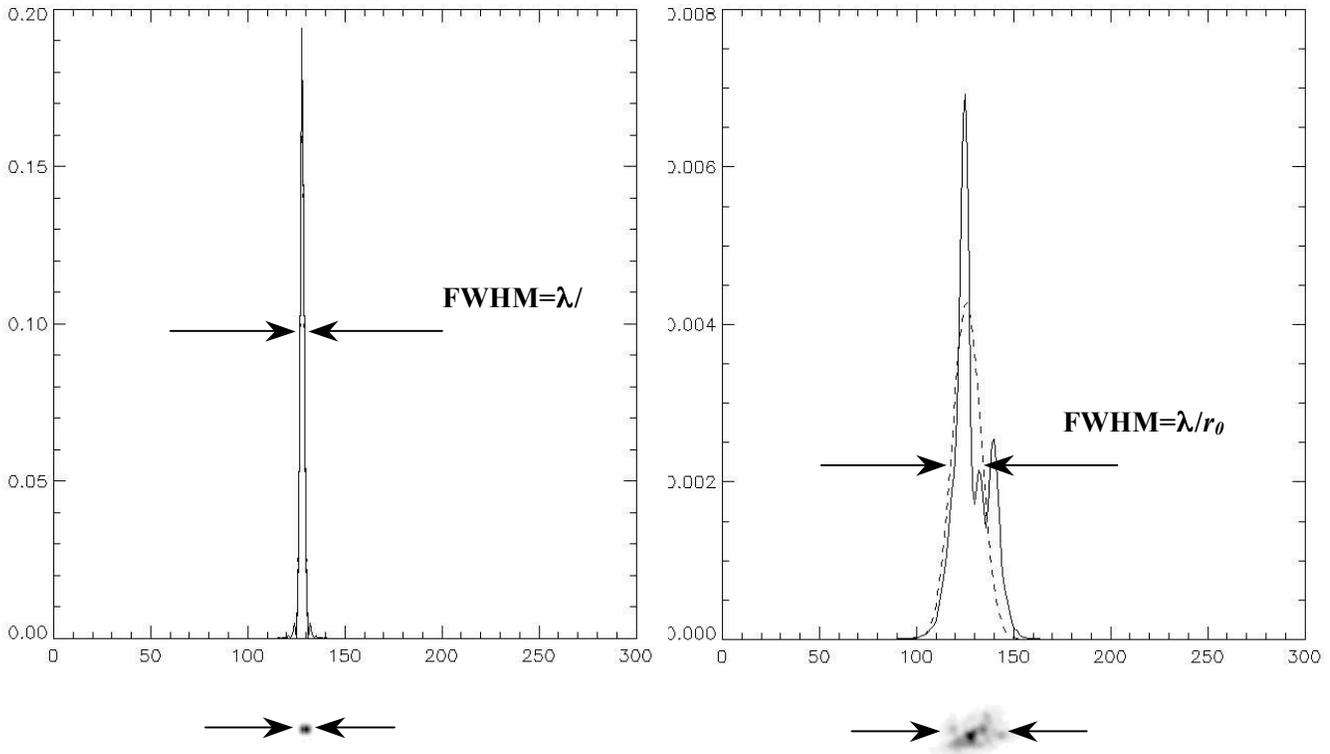


Figura 4.15. Izquierda: Ancho a media altura (FWHM) de la figura de Airy obtenida para la subpupila de 20mm y la longitud de onda del laser He-Ne. Derecha: Ancho a media altura (FWHM) de la imagen integrada -escala del píxel en el plano imagen de 1.8 segundos de arco por píxel-.

Simultáneamente a este trabajo se realizaron mediciones de speckles en un montaje similar al de Figura 4.16. Las mediciones se llevaron a cabo en el laboratorio de óptica del IA-UNAM^[3]. Al comparar nuestros resultados obtenidos numéricamente con los valores obtenidos directamente en laboratorio, identificamos que los resultados son congruentes. Ver Tabla 4.4.

Pantalla de fase 19	Mediciones a partir de imágenes speckle generadas con IDL	Mediciones a partir de imágenes speckles experimentales ^[3]
D/r_0	4.4	3.7

Tabla 4.4. Comparación de D/r_0 obtenido por dos métodos diferentes. Numéricamente y a partir de un montaje óptico.

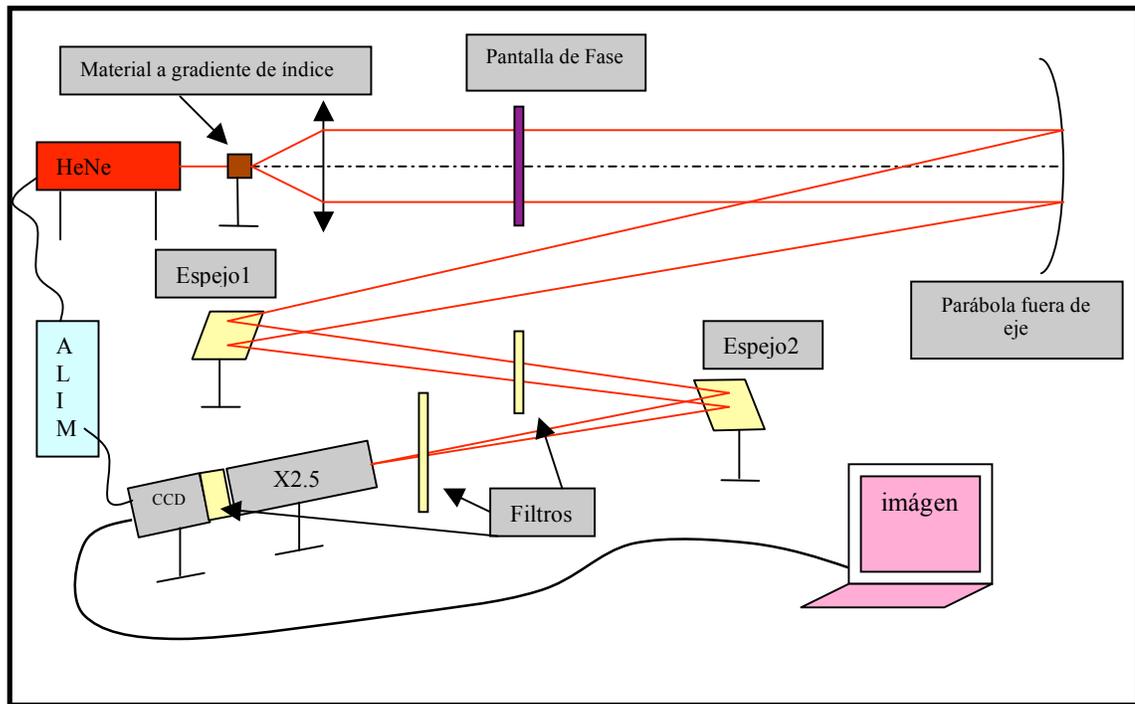


Figura 4.16. Montaje para medir experimentalmente el ancho a media altura y posteriormente el D/r_0 a partir de imágenes speckle producidas por una subpupila de la pantalla de fase.

Obtención del diámetro de Fried (r_0)

De acuerdo con lo anterior se realizó también un programa que calcula el espectro de potencia y el diámetro de Fried en subpupilas de 20mm de diámetro. Con el programa llamado *PS&r0_PUPILA* se obtuvieron resultados para un gran número de subpupilas. Como ejemplo, el resultado obtenido por el programa se muestra en la siguiente tabla y en la gráfica de la Figura 4.17.

Pantalla de fase 19 de acrílico	
$r_0(\lambda=0.6328nm)$	~5mm

Tabla 4.5. Diámetro de Fried (r_0) en una subpupila de 20mm en la pantalla de fase 19 de acrílico obtenido con el programa *PS&r0_PUPILA*.

El diámetro de Fried promedio obtenido para la pantalla de fase 19 de material acrílico en subpupilas de 20mm de diámetro es $r_0(\lambda=0.6328 \mu\text{m})=5\text{mm}$. Este valor concuerda con los resultados obtenidos previamente en el análisis del D/r_0 en el que se calculó indirectamente el r_0 .

Por lo anterior podemos afirmar que la calibración del programa es correcta y confiable para los análisis posteriores que se deseen llevar a cabo.

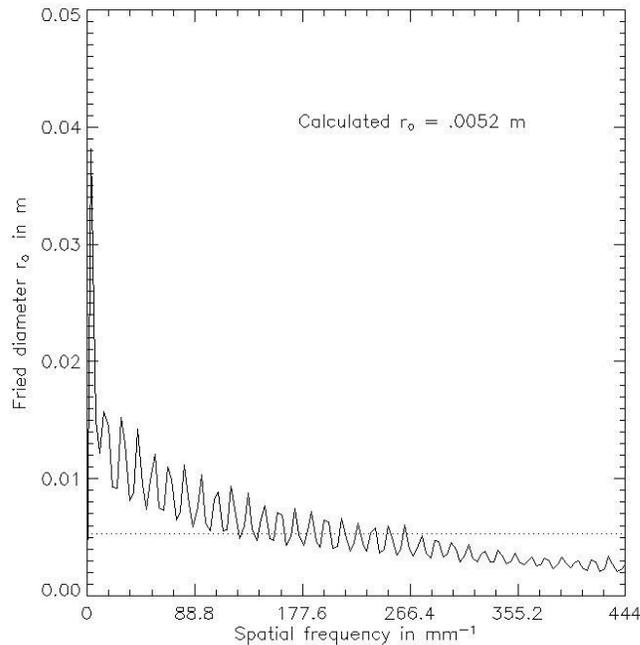


Figura 4.17. Ejemplo de cálculo del valor de r_0 mediante el programa *PS&r0_PUPILA*. Resultado para una subpupila de la pantalla de fase 19 de material acrílico: $r_0(\lambda=0.6328\text{nm})=5\text{mm}$.

En el inicio de este trabajo mencioné que se desarrollaría la primera etapa de construcción del simulador de turbulencia atmosférica. La segunda es realizar el diseño y montaje ópto-mecánico junto con la electrónica de control.

Sugerencia para el montaje óptico e implementación final del simulador

Como parte final de este trabajo podemos sugerir que es posible simular una dinámica de la atmósfera más realista con las pantallas de fase por medio de la rotación de éstas, o el desplazamiento de una con respecto a otra –usando dos pantallas de fase–. Con un montaje de este tipo es posible simular múltiples capas. Un posible esquema del montaje óptico se muestra en la Figura 4.18.

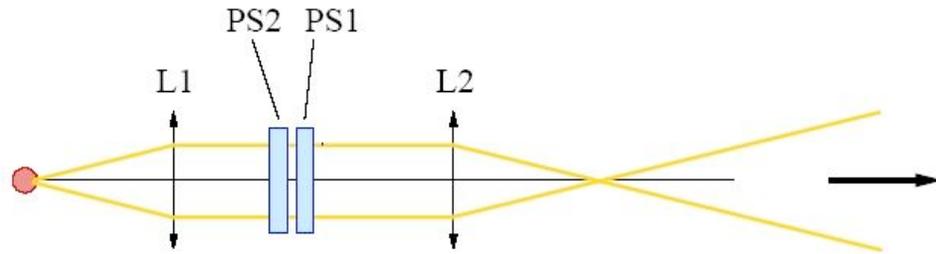


Figura 4.18. Esquema del posible montaje óptico donde L1 y L2 son lentes colimadoras del haz y PS1 y PS2 son las pantallas de fase.

En la Figura 4.19 se detalla una pantalla de fase en su eje de rotación, y diferentes subpupilas.

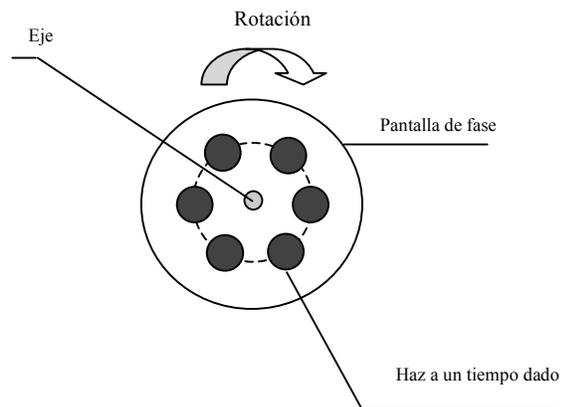


Figura 4.19. Detalle de la pantalla de fase en su eje de rotación y presentando secuencialmente diferentes subpupilas frente al haz.

En la Figura 4.20 podemos apreciar un posible montaje opto-mecánico (incluyendo electrónica –motores-) del simulador de turbulencia completo. Las pantallas de fase de material acrílico estarían montadas directamente en los ejes de los motores que controlan la velocidad de rotación simulando así la dinámica de la atmósfera turbulenta^[21].

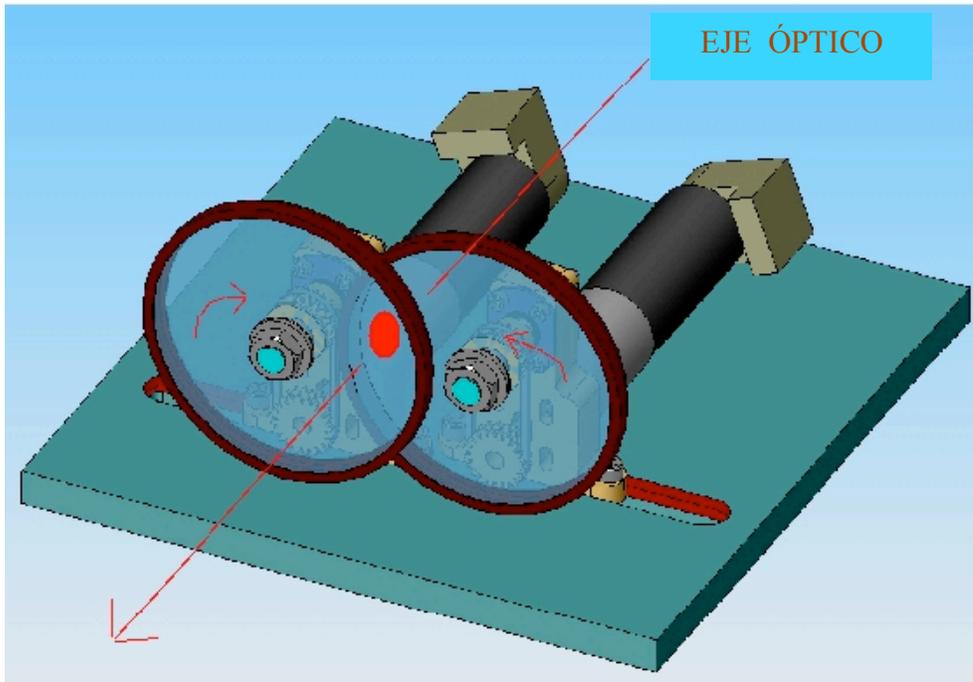


Figura 4.20. Ejemplo de montaje opto-mecánico de las pantallas de fase en el sistema que simularía la turbulencia óptica y la dinámica atmosférica mediante el giro proporcionado por los motores. La flecha indica la dirección del haz y la pupila está ubicada en la intersección de las dos pantallas de fase.

CONCLUSIONES

Al realizar este trabajo, logramos identificar que uno de los problemas en la Astronomía Observacional es la atmósfera terrestre pues en ella ocurren fenómenos de absorción y desviación de los rayos (ondas electromagnéticas) provenientes de algún objeto observado. Estos fenómenos en su conjunto se conocen como **turbulencia óptica** producida por la atmósfera terrestre. Esta turbulencia óptica deteriora la calidad de las imágenes observadas mediante un telescopio, en particular en la ventana del espectro electromagnético visible: de 400nm a 700nm.

El desarrollo y construcción de un simulador de turbulencia óptica en laboratorio constituye una útil herramienta que servirá para probar y calibrar instrumentos (p.e. SCIDARGM y Guieloa) cuya función es realizar mediciones de la turbulencia óptica y mejorar la calidad de las imágenes astronómicas.

Como primera etapa de este trabajo, se llevó a cabo un estudio de la teoría de la turbulencia óptica. Según la descripción estadística de Kolmogorov y haciendo diversas hipótesis para simplificar el análisis, en última instancia la turbulencia óptica se puede modelar como una **perturbación del frente de onda**.

El problema de realizar una simulación realista de la turbulencia óptica radica principalmente en recrear con la estadística correcta los efectos que producen las variaciones del índice de refracción en la propagación de las ondas electromagnéticas en la atmósfera. En este trabajo, se hizo una revisión exhaustiva de la tecnología que existe para simular la turbulencia óptica.

De acuerdo con los requerimientos de los proyectos instrumentales del IA-UNAM y con base en el conocimiento teórico del fenómeno de la turbulencia, la mejor opción retenida fue el método de pantallas de fase transmisivas. Para ser precisos: *Pantallas de fase con soporte de vidrio y múltiples capas de acrilatos y Pantallas de fase de material acrílico.*

En los laboratorios del IA-UNAM se fabricaron las pantallas de fase y se realizaron mediciones precisas con el interferómetro ZYGO GPI.

Para una posterior caracterización de las pantallas de fase se desarrollaron una serie de programas en IDL. Los códigos fueron calibrados de manera muy precisa por medio de mapas de fase generados numéricamente.

Los resultados de las mediciones realizadas con el interferómetro ZYGO GPI fueron caracterizados para un tamaño específico de subpupila. Obteniendo resultados congruentes con las pruebas de imágenes “perturbadas” realizadas en laboratorio.

El método de obtención de *Pantallas de fase de vidrio con múltiples capas de acrilatos* resultó ser bastante lento y delicado debido a los materiales y al proceso de fabricación. Por esta razón se decidió explorar y posteriormente utilizar la técnica de generación de *Pantallas de fase de material acrílico transparente*, que resultó ser una técnica de generación más sencilla que la primera.

De acuerdo con los resultados obtenidos en la caracterización encontramos que las *Pantallas de fase de material acrílico* se comportan de manera muy similar a la turbulencia óptica en la atmósfera terrestre. Estas pantallas de fase funcionan como un filtro pasa bajas, característica muy deseable puesto que las capas turbulentas de la atmósfera también se comportan así. Adicionalmente, la dinámica de la atmósfera turbulenta se puede simular con un movimiento relativo de las pantallas de fase.

Como una aportación novedosa de este trabajo, proponemos la inclusión de *las pantallas de fase de material acrílico* en el diseño e implementación del simulador de turbulencia óptica en laboratorio.

APÉNDICE A

DESCRIPCIÓN DE LAS PRINCIPALES RUTINAS PROGRAMADAS EN IDL

Las rutinas para la caracterización de las pantallas de fase fueron programadas en IDL^[6].

GEN_NUM_FASE_aMPL.

Generación numérica de mapas de fase y mapas de amplitud por medio de TurbuLenZ.

La generación numérica de los mapas de fase y amplitud se lleva a cabo mediante TurbuLenZ, que a su vez utiliza librerías de *astrolib* para simular múltiples capas de la turbulencia atmosférica, para un lapso determinado. Se genera cierto número de mapas de fase de acuerdo con el muestreo deseado (escala de píxel).

PHASEUNWRAPPING

Algoritmo de corrección del enrollamiento de fase producido por error en TubuLenZ04, basado en el método de mínimos cuadrados.

Se realizó una modificación en el algoritmo de corrección del enrollamiento de fase cuyo principio se basa en cálculo de mínimos cuadrados. Es una solución para problema del *enrollamiento* de la fase por ajuste de mínimos cuadrados en dos dimensiones, mostrando que es una solución más sencilla de comprender e implementar que las soluciones publicadas previamente. Extiende la fase a una función periódica utilizando la reflexión de espejo y la ecuación resultante se resuelve utilizando la transformada rápida de Fourier.

FACTOR_ESCALA_r0

Escalamiento de pantallas de fase para obtener de manera rápida nuevos mapas de fase.

El programa de escalamiento de fase se realizó para obtener de manera rápida y eficiente nuevos mapas de fase y de amplitud a partir de los ya existentes utilizando factores de escala para obtener los mapas de fase escalados.

LEE_AMPLITUD_FASE

Lectura de los mapas de fase y mapas de amplitud generados numéricamente por TurbuLenZ.

Después de generar los mapas de fase y de amplitud se realizó un programa que lee la información generada y despliega gráficamente la fase y la amplitud del frente de onda de acuerdo con los parámetros entrados al simular las pantallas en TurbuLenZ.

GEN_SPECKLES, GEN_IMÁGENES

Generación de imágenes a partir de mapas de fase y amplitud.

Se realizó un programa que genera imágenes similares a las que se verían en el plano focal de un telescopio después de varios segundos de exposición. La intensidad U se calcula, para cada paso de tiempo, por medio del módulo cuadrado de la transformada de Fourier de la onda compleja: $\text{Intensidad} = |FFT(U)|^2$. La imagen final es la suma de todas las imágenes (intensidades) obtenidas de manera instantánea.

CÁLCULO_FWHM

Aproximación de la imagen a una distribución gaussiana y cálculo del FWHM.

El programa realiza un ajuste a una distribución gaussiana de la imagen para obtener el ancho a media altura y finalmente un valor del *seeing* o resolución angular. Se compara dicho valor con el valor teórico.

POWER_SPECTRUM&r₀

Cálculo del espectro de potencia y del r₀ de los mapas de fase.

El programa que calcula el valor del diámetro de Fried lo hace mediante el módulo cuadrado de la transformada de Fourier o espectro de potencias de la fase. Considera una distribución espectral de Kolmogorov.

LEE_ASCII_ZYGO

Lectura pantallas de fase desde archivos ASCII obtenidos con el software ZYGOMetroPro y ajuste de un plano tip/tilt.

Para realizar la caracterización de las pantallas de fase es necesario tomar los datos del interferómetro y tratarlos con un programa en IDL que lea los datos para poder posteriormente restarle el plano tip/tilt y calcular el valor de r₀. El programa realiza lectura por renglones y columnas, se introducen los parámetros correspondientes a la escala del píxel y al tamaño original de la matriz del archivo ASCII original, información obtenida del software MetroPro.

FILTRAFASES

Lee la realización de una pantalla de fase medida con el interferómetro ZYGO en longitudes de onda (lambdas) ya corregida por Tip/Tilt.

Se utiliza un filtro mediano para realizar el filtrado de altas frecuencias espaciales. Se hace una integral del área filtrada para verificar que no haya demasiadas pérdidas de “energía” de altas frecuencias.

PS&r₀_PUPILA

Cálculo del espectro de potencia y del r₀ en un subpupila.

Para simular la apertura escalada de un telescopio se realizan mediciones del r₀ en una o varias subpupilas de 2 cm de diámetro que se superponen a una trayectoria circular dentro de la pantalla de fase.

APÉNDICE B PROCEDIMIENTO S PARA LA GENERACIÓN Y MEDICIÓN DE PANTALLAS DE FASE EN LABORATORIO

Para la generación y medición de las pantallas de fase se desarrollaron protocolos de operación sugeridos para un óptimo desarrollo del trabajo en laboratorio.

Cada pantalla requiere de una importante inversión de tiempo y trabajo que deben ser bien administrados. Se requiere realizar muchas pruebas para obtener pantallas lo suficientemente buenas que permitan hacer mediciones y caracterizarlas de este modo en el interferómetro ZYGO GPI-HS.

B.1 PROCEDIMIENTO PARA LA GENERACIÓN DE PANTALLAS DE FASE EN LABORATORIO

La generación de pantallas de fase se realizó en el Laboratorio de Electrónica y de Usos Múltiples del IA-UNAM observando las siguientes condiciones:

Entrar al laboratorio con la vestimenta adecuada (bata, cubre-zapatos, gorro, cubrebocas, guantes, etc.).

Llevar un registro de las pantallas de fase numerando de manera permanente en el canto y poner una marca de referencia para la orientación espacial. Puede ser de utilidad posteriormente para la eliminación de errores o para interpolar alguna zona en la que no hubo transmisión.

Limpiar perfectamente los vidrios o acrílico a utilizar (lavar con agua y jabón y posteriormente limpiar con alcohol y secar cubriéndolos para evitar que se llenen de pelusa).

Evitar tocar con los dedos la superficie del vidrio o acrílico.

Anotar la metodología de aplicación de la laca.

Realizar la aplicación de laca con atomizador que se hará a una altura de 8 a 10 cm lo suficientemente rápido y con velocidad constante para obtener una capa uniforme sobre la superficie del vidrio. Alturas mayores de 10 cm provocan partículas secas, alturas menores a 8 cm provocan escurrimientos y aglutinamiento del material en una zona, es decir se obtienen capas defectuosas y por tanto pantallas de fase inservibles.

Asegurarse que al rociar solamente una superficie del vidrio reciba laca y para tal propósito fabricar máscaras de cartón y masking tape, cartulina, corcho en la zona central...)

La aplicación de laca se debe hacer procurando que el lugar sobre el que se apoye el vidrio no tenga pendiente y que toque lo menos posible el vidrio, pero proporcionando en todo momento buen soporte.

Después de la aplicación de una capa de laca secar protegiendo al vidrio del ambiente. Las alternativas para secado son por medio de calor utilizando horno de microondas y lámpara con foco de 100W o al aire libre, observando que el resultado no depende del método de secado.

Repetir el procedimiento anterior para depositar múltiples capas de acrilatos.

B.2 PROCEDIMIENTO PARA LA MEDICIÓN DE PANTALLAS DE FASE EN LABORATORIO

Numerar las pantallas de fase de manera permanente en el canto o superficie y poner una marca de referencia permanente para la orientación espacial sobre el vidrio o acrílico.

Entrar al laboratorio con la vestimenta adecuada (bata, cubre-zapatos, gorro, cubrebocas, guantes, etc.).

Llevar un flexómetro y escuadra.

Establecer una distancia de colocación de la pantalla y un zoom constante.

Colocar las pantallas de fase en el soporte de 5 ejes alineadas perpendicularmente al haz del interferómetro.

Revisar los parámetros preestablecidos del ZYGO GPI- HS. (DisconAction, DisconFilter, CameraRes, PhaseRes, etc.).

Registrar los valores específicos de usuario como zoom, tip/tilt en el ZYGO GPI-HS y verificar que en cada medición sean los mismos o verificar en cada medición cuales son los valores establecidos.

Cuidar o revisar el ángulo de colocación del vidrio (pantalla de fase), realizar una medida con el ZYGO GPI- HS y minimizar la inclinación (tip/tilt).

Modificar manualmente el tip/tilt del vidrio para saber si la transmisión se ve afectada por la inclinación o si se debe al algoritmo del ZYGO GPI- HS.

Al realizar las mediciones en el interferómetro ZYGO GPI-HS es necesario alinear el espejo con la referencia, notando en la pantalla destinada para la visualización, las franjas de interferencia debidas a la diferencia de camino óptico del haz proveniente de la superficie reflejante de la referencia y el proveniente del espejo plano.

Realizar la medida de la escala de píxel.

Anotar en una bitácora (o en tablas previamente diseñadas) las mediciones realizadas.

Se sugiere que las tablas incluyan:

Número del vidrio soporte de la pantalla, diámetro, con o sin laca, tipo de laca, metodología de aplicación de la laca, número de capas aplicadas, escala de píxel, PV (100%), RMS (100%), PV (25%), RMS (25%), método de secado. (Ver tablas B.1 y B.2).

Grabar los archivos (ASCII) en disco duro de la computadora reservada para el uso del interferómetro.

Documentar con fotografías o video las mediciones en laboratorio

Nota: El procedimiento es el mismo para los vidrios, acrílicos limpios y para las pantallas de fase.

Vidrio 1/8". 8cmφ sin laca	PV (100 %)	RMS (100%)	PV (25%)	RMS (25%)
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				

Tabla B.1. Tablas utilizadas para anotar mediciones hechas en laboratorio en el interferómetro ZYGO GPI-HS.

Vidrio 1/8". 8cmφ con laca	PV(100%)	RMS (100%)	PV (25%)	RMS (25%)	Número de capas	Metodología de aplicación	Método de secado	Coord. centro
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								
9								
10								

Tabla B.2 Tablas utilizadas para anotar mediciones hechas en laboratorio en el interferómetro ZYGO GPI-HS.

APÉNDICE C DESCRIPCIÓN DEL INTERFERÓMETRO ZYGO

La interferometría puede ser utilizada para estudiar las variaciones de fase de un frente de onda óptico. Un campo de aplicaciones de la interferometría es por ejemplo el estudio del flujo, combustión y difusión de los gases en los que los cambios locales del índice de refracción se relacionan con los cambios en la presión, en la temperatura o en la concentración relativa de los diferentes componentes. Otra aplicación importante consiste en realizar pruebas a componentes y sistemas ópticos.

En interferometría es posible comparar superficies planas utilizando las llamadas franjas de interferencia de grosor constante^[12, 14]. El modo más sencillo para hacerlo es tener dos superficies juntas y observar las franjas formadas en incidencia normal en la delgada capa de aire que las separa. Si las desviaciones de la prueba de calidad de la superficie plana son pequeñas, el plato superior se inclina ligeramente para tener una capa de aire oblicua. De este modo si el espaciamiento entre franjas es a , y la máxima desviación de la franja recta diametral es δ , el máximo error de la superficie es $(\delta/a)(\lambda/2)$.

En la Figura C.1 se muestra el diagrama esquemático de un interferómetro de Fizeau que utiliza una lente para colimar la luz, como alternativa también se puede utilizar un espejo cóncavo. Se puede obtener mayor exactitud si se aplican capas reflectoras al plano de referencia y a la superficie bajo prueba de modo que sea posible la formación de franjas por medio de haces múltiples.

Con un interferómetro de Fizeau es posible hacer mediciones absolutas de las irregularidades de una superficie plana utilizando una superficie líquida como una superficie de referencia plana asegurando que se excluye la vibración externa, es decir, se procura trabajar en una mesa óptica. También es posible caracterizar tres superficies combinando el orden en el que se acomodan para evaluar los errores individuales de cada una de ellas.

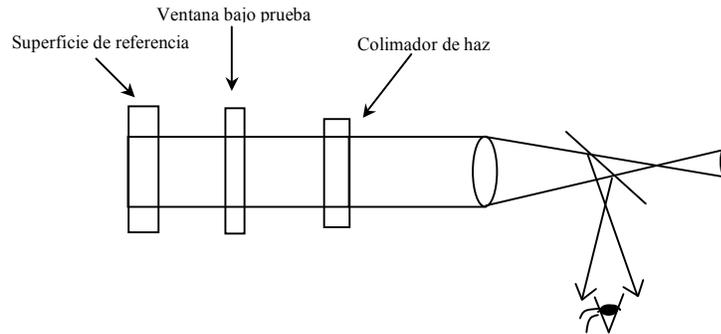


Figura C.1. Sistema óptico de un interferómetro de Fizeau.

Una aplicación muy común para el interferómetro de Fizeau es revisar el paralelismo de las caras de una placa de material transparente (vidrio). Los problemas de coherencia se solucionan con una fuente láser y de este modo se pueden analizar placas más gruesas.

C.1 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DEL INTERFERÓMETRO ZYGO

El interferómetro ZYGO es un interferómetro de tipo Fizeau, que utiliza un haz láser, (HeNe) de $\lambda=633$ nm, con modulación de fase. Es el instrumento que se ocupó para caracterizar la superficie de las pantallas de fase y de este modo tener información cualitativa y cuantitativa sobre las pantallas de fase y el efecto de éstas sobre el frente de onda.

El funcionamiento del interferómetro ZYGO consiste en formar una cavidad óptica entre la muestra y el patrón de superficie que funciona en transmisión, y en modular la longitud de esta cavidad por desplazamiento del patrón, lo que permite adquirir varios puntos de medida sobre la curva de variación de fase. En este caso, el patrón es un espejo plano. Lo movemos hasta obtener el "Campo Plano" y luego ponemos la pantalla de fase obteniendo franjas de interferencia curvadas. Se realiza la adquisición de los interferogramas con una PC y el análisis de los datos obtenidos con el software MetroPro, a través del cual es posible obtener el perfil del frente de onda, el espectro de potencia, imágenes y estadísticas sobre las mediciones.

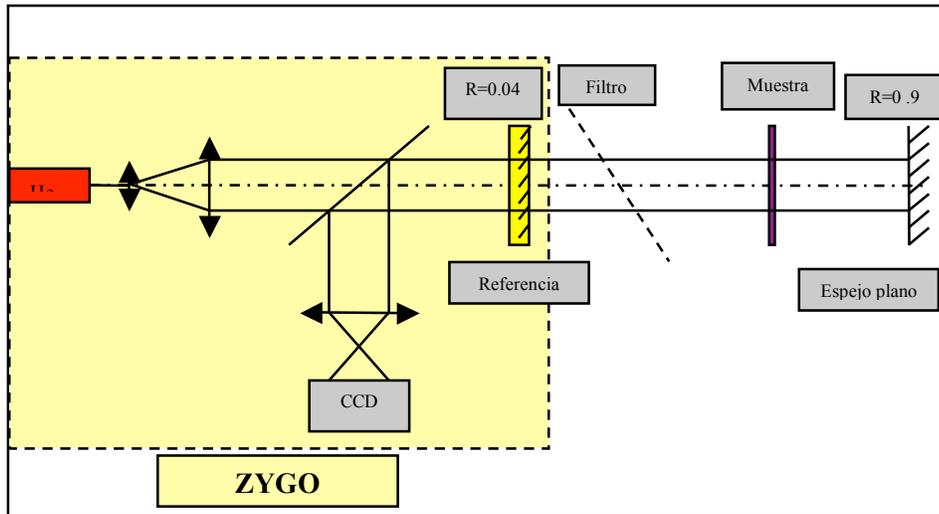


Figura C.1 Esquema del montaje óptico y del interferómetro ZYGO.

Un esquema sencillo del interferómetro ZYGO utilizado para realizar las mediciones de las pantallas de fase se muestra en la Figura C.1. En la Figura C.2 se muestra un esquema más detallado. La fotografía del interferómetro se muestra en la Figura C.3. Un problema usual en las pruebas realizadas a superficies planas, es el efecto de interferencia, causado por las reflexiones de la superficie posterior (franja fantasma). Este problema se puede solucionar utilizando un láser multimodo. La función de coherencia de dichos láseres es periódica, con un ancho máximo muy estrecho, y de este modo si se coloca la superficie a prueba a una distancia de la superficie de referencia igual a un múltiplo de la longitud de la cavidad del láser. También es posible utilizar una fuente sintonizable y un algoritmo de desplazamiento de fase que elimine las modulaciones que realiza la interferencia debido a las reflexiones falsas.

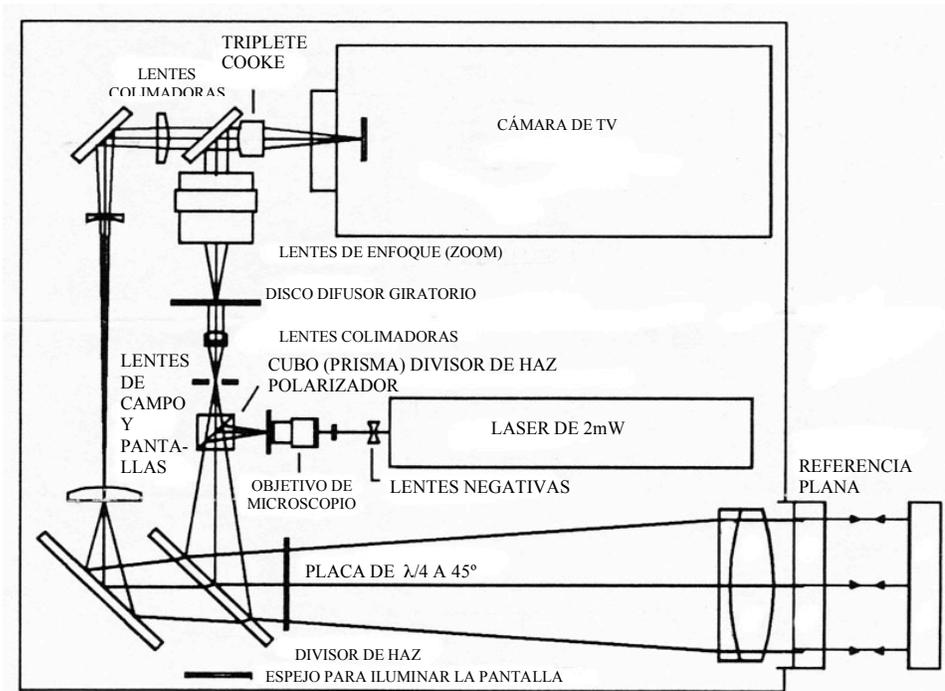


Figura C.2. Esquema detallado del interferómetro ZYGO

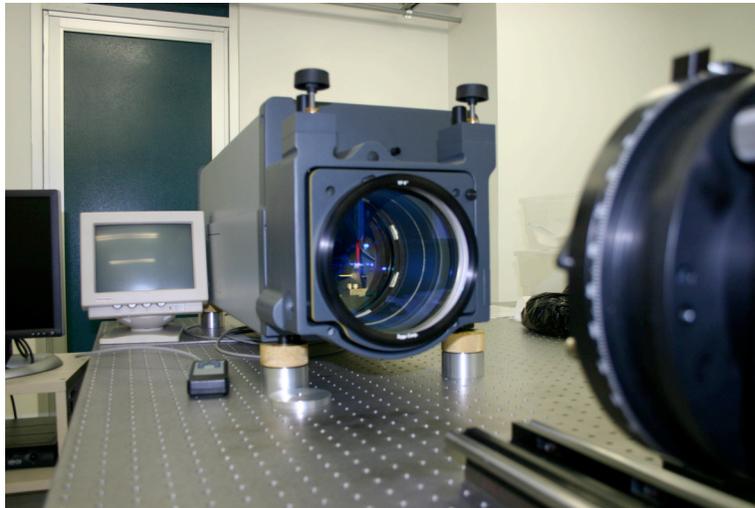


Figura C.3 Fotografía del interferómetro ZYGO GPI-HS en el laboratorio de óptica del IA-UNAM

C.2 ESPECIFICACIONES DEL INTERFERÓMETRO ZYGO SISTEMA GPI XP, GPI XPHR, GPI HS

Se muestra la información técnica del interferómetro ZYGO que se utilizó para realizar las mediciones^[27]

MODELOS

GPI XP	Interferómetro de corrimiento de fase (modelo base) con resolución estándar.
GPI XPHR	Modelo GPI XP con cámara de alta resolución y alta velocidad.
GPI HS	Modelo GPI con alta capacidad de inclinación, y cámara digital para mejorar resolución en franjas muy juntas, mide más tipos de superficies.

SISTEMA

Técnica de medición	Láser, tridimensional, interferometría óptica de corrimiento de fase.
Capacidad de medición	Mediciones de superficies reflectivas y ópticas y frentes de onda transmitidos ópticamente.
Opciones de diámetro del haz de prueba	102 mm (4 inch). 152 mm (6 inch).
Opciones de montaje	Horizontal y vertical, vista hacia arriba y hacia abajo.
Línea de centrado óptico	108 mm (4.25 inch).
Sistema de alineado	Quick Fringe Acquisition System (QFAS) con retícula de mancha doble.
Rango de acercamiento (zoom)	6:1
Alineamiento del campo de vista	102 mm: ± 3 grados 152 mm: ± 2 grados
Rango del foco de la pupila	GPI XP, GPI XPHR: -800mm/+1600 mm apertura de salida 102 mm. GPI HS: -400mm/ +1700 mm apertura de salida 102 mm.
Vista previa de imagen	Monitor adicional incluido.
Computadora	Procesador de última generación Dell, CD-R/W, lector de disco flexible, monitor de pantalla plana de 17 plgd; impresoras opcionales.
Software	ZYGO MetroPro en plataformas Windows 2000 Microsoft.

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

Dimensiones (altura x ancho x profundidad)	Horizontal, 4 inch:
--	---------------------

	308 x 694 x 308 mm (12.1 x 27.3 x 12.1 in.) Horizontal, 6 inch: 308 x 992 x 308 mm (12.1 x 36.3 x 12.1 in.) Vertical: Altura (H) x 686 x 686 mm H x 27 x 27 in. 1 metro H = 1000 mm (39.4 in) 1.5 metros H = 1500 mm (59 in.) 2 metros H = 2000 mm (78.7 in.)
Peso (aproximado)	Horizontal, 4 inch: 36 kg (80 lb) Horizontal, 6 inch: 41 kg (90 lb) Vertical, 4-inch: 73 kg (160 lb) Vertical, 6-inch: 77 kg (170 lb)

RENDIMIENTO

Repetitibilidad de la prueba de 3 superficies planas ⁽¹⁾	$\lambda/300$ (2σ)
Repetitibilidad PV ⁽²⁾	GPI XP, GPI XPHR: $\lambda/1,000$ (2σ) GPI HS: $\lambda/1,200$ (2σ)
Repetitibilidad de rms	GPI XP, GPI XPHR: $\lambda/10,000$ (2σ) GPI HS: $\lambda/15,000$ (2σ)
Muestreo espacial	GPI XP: 320 x 240 píxeles GPI XPHR: 640 x 320 píxeles GPI HS: 776 x 576 píxeles Todos los modelos: 1K x 1K píxeles, opcional
Resolución de franjas ⁽³⁾	Resolución mejor que $\lambda/8,000$ (paso doble) GPI XP: 90 fringes GPI XPHR: 180 fringes GPI HS: 220 fringes
Tiempo de adquisición de datos	Low Res: 140 ms (7 data frames) High Res: 260 ms (13 data frames)
Digitalización	8 bits

REQUERIMIENTOS TÉCNICOS

Voltaje de alimentación	100 a 240 VAC, 50/60Hz
Aire comprimido	80psi (5.5bar) fuente seca y con filtro (requerida para sistema de aislamiento de vibración)

REQUERIMIENTOS AMBIENTALES

Temperatura	15 a 30°C (59 to 86°F)
Tasa de cambio de temperatura	<1.0°C per 15 min

Humedad	5 a 95% relativo, vibración no reducida (non condensing vibration)
Aislamiento de vibración	Requerido para frecuencias en el rango de 1 Hz a 120 Hz

ESPECIFICACIONES DEL LASER

Tipo	Helio-Neón, Clase 11
Longitud de onda	632.8 nm
Potencia de salida en la apertura	≤1 miliwatt
Polarización del haz	Circular, Lineal cambio opcional
Longitud de coherencia	Mayor a 100 m (328 ft)

CARACTERÍSTICAS DE LAS OBJETOS A PRUEBA

Material	Varios; vidrio, metales súper pulidos, cerámicas y plásticos
Preparación	Ninguna (típicamente); las mediciones se realizan en condiciones adecuadas de laboratorio sin contacto y no destructivas
Tamaño (altura x ancho x profundidad)	254 x 203 x 203 mm (10 x 8 x 8 in.) con montura de 2 ejes ajustable
Peso	≤ 22.7 kg (50 lb)
Reflectividad	0.1% a 100% (basada en un elemento de transmisión)
Calidad del sistema ⁽⁴⁾	Prueba plana: $\lambda/20$ Prueba esférica: $\lambda/10$

NOTAS

1 La repetibilidad de la prueba de tres superficies planas es un ejemplo práctico del desempeño del instrumento en condiciones reales de trabajo. La superficie plana 'A' se prueba seis veces utilizando la prueba de las tres superficies planas, utilizando los seis pares de superficies planas disponibles B, C, D y E hasta completar seis combinaciones de superficies planas, tomando 16 promedios de fase por combinación. La especificación representa el valor 2σ de las seis pruebas de tres superficies planas. La exactitud del sistema depende de la calidad de la referencia óptica.

2 La repetibilidad de las estadísticas citadas es para 100 mediciones de la misma cavidad, con 16 promedios de fase por conjunto de datos. La especificación dice que debe ser 2σ para cada estadística.

3 Número aproximado de franjas debidas a la inclinación en la parte de la imagen que el interferómetro puede resolver a 1X.

4 La calidad del sistema depende de exactitud de transmisión del elemento, distorsión geométrica y óptica y el sistema de video utilizado para ver las imágenes y el número de franjas utilizado en la evaluación. El GPI está diseñado para dar el mejor rendimiento ($\lambda/20$) cuando se utilizan menos de 7 franjas para medir una superficie plana.

BIBLIOGRAFÍA

1. Ávila, R., Masciadri, E., Vernin J., & Sánchez, L. J. Generalized SCIDAR Measurements at San Pedro Mártir. I. Turbulence Profile Statistics PASP 116-821, 682, 2004.
2. Babcock, H. W. Adaptive Optics in perspective. Bulletin of the American Astronomical Society, 24, 821, 1992.
3. Bohi, Guillaume. “Caracterización de placas de fase aleatorias para pruebas de aceptación de sistemas de óptica adaptativa”. Reporte de practicas. 2005.
4. Cuevas, S. et al. GUIELOA: Adaptive Optics System for the 2.1 m SPM UNAM Telescope. RevMexAA (Serie de Conferencias), 21, 235, 2004.
5. Cuevas, S. Comunicación privada. 2005.
6. Fanning, D.W. *Coyote's Guide to IDL Programming*. <http://www.dfanning.com>
7. Fermeña Castella, B. Alternatives for the Turbulence Generator in the GTCAO Calibration System. Reporte para el GTC. Instituto de Astrofísica de Canarias, 2004.
8. Fried, D. L. Optical resolution through a randomly inhomogeneous medium for very long and very short exposures, JOSA, 56, 1372, 1966.
9. Fuchs, A., Tallon, M., & Vernin, J. Folding of the vertical atmospheric turbulence profile using an optical technique of movable observing plane in Proc. SPIE on Atmospheric Propagation and Remote Sensing III, Orlando(Florida) U.S.A., eds W.A. Flood, and W.B. Miller 2222, 682, 1994.
10. Fuchs, A., Tallon, M., & Vernin, J. Focusing on a turbulent layer: principle of the “Generalized SCIDAR” PASP 110, 86, 1998.
11. González Alonso, S. I. Simulaciones de los efectos instrumentales del SCIDAR generalizado, Tesis de Lic. Facultad de Ciencias, UNAM, 2002.
12. Hariharan, P. Optical Interferometry. Academic Press, Sydney, Australia, 2003.

13. Ibáñez Roman, F. Análisis de perfiles de velocidad de viento en capas turbulentas. Tesis de Lic. Centro Universitario de Ciencias Exactas y Tecnología, U. de G., 2002.
14. Malacara, D. Optical Shop Testing. John Wiley & sons, Inc., USA, 1992.
15. Otsubo, M. Takami, H. y Iye, M., Holographic atmospheric turbulence simulator for testing adaptive optics systems, PASP. 109, 1057, 1997.
16. Prieur, J-L. Ávila, R. Daigne, G. & Vernin, J. Automatic Determination of Wind Profiles with Generalized SCIDAR 116-822,778, 2004.
17. Pritt M. D. & Shipman J. S. Least-Square Two-dimensional Phase Unwrapping using FFT's, IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, 32-3, 706, 1994.
18. Rhoadarmer, T. A. & Roger P. A. Low-cost, broadband static phase plate for generating atmosphericlike turbulence. Appl. Opt. 40-18, 2946, 2001.
19. Roddier, F. Adaptive Optics in Astronomy. Cambridge University Press, UK, 1999.
20. Schofield M. A. & Zhu, Y. Fast phase unwrapping algorithm for interferometric applications, Optics Letters 28-14, 1194, 2003.
21. Thomas, S. A simple turbulence simulator for adaptive optics. Proc. of the SPIE, 5490, 766, 2004.
22. Tyson, R. K. Introduction to Adaptive Optics. SPIE Press, USA, 2000.
23. Tyson, Robert K. Principles of Adaptive Optics. Academic Press, Boston, USA, 1997.
24. Watson, A. GUIELOA Óptica Adaptativa para el OAN-SPM. <http://www.astrosmo.unam.mx/~alan/talks/2003-11-07-guieloa.pdf>. UNAM, 2003.
25. Weiss, R. The ALFA TurbuLenZ homepage. <http://www.mpia-hd.mpg.de/ALFA/MENU/tlz.html>
26. <http://idlastro.gsfc.nasa.gov>
27. http://www.lambdaphoto.co.uk/pdfs/GPI_xp_spec.pdf