



**INAOE**

**Pruebas Ópticas con Rejilla de Ronchi sub-estructurada  
Utilizando Longitud de Onda Equivalente**

por

**Anmi García Arellano**

Tesis sometida como requisito parcial  
para obtener el grado de

**DOCTOR EN CIENCIAS EN LA  
ESPECIALIDAD DE ÓPTICA**

en el

**Instituto Nacional de Astrofísica,  
Óptica y Electrónica**  
Enero 2012  
Tonantzintla, Puebla

Supervisada por:

**Dr. Fermín Salomón Granados Agustín y  
Dr. Manuel Campos García**  
Investigador Titular 'A' de T.C. INAOE  
Técnico Académico Titular 'C', CCADET-UNAM

© INAOE 2012

Derechos reservados

El autor otorga al INAOE el permiso de reproducir y  
distribuir copias de esta tesis en su totalidad o en partes



# Resumen

En este trabajo se presenta una propuesta experimental como solución a los problemas típicos que aparecen en interferometría con una longitud de onda en el visible. Para ello, se revisan algunas alternativas de solución, los conceptos básicos de la Prueba de Ronchi y del concepto de longitud de onda equivalente, así como los aspectos necesarios para la generación de Ronchigramas con longitud de onda equivalente. Asimismo, se han ideado algunos ejemplos con el propósito de aclarar y enfatizar la ventaja de utilizar una longitud de onda más grande, conocida comúnmente como longitud de onda equivalente, efectiva o sintética.

Por otra parte, se discuten los métodos computacionales principales que deben de utilizarse para generar Ronchigramas con longitud de onda equivalente. Algunos de estos procedimientos, que son aplicados en las etapas de pre-procesamiento, ayudan a mejorar la visibilidad de las franjas en los resultados finales. Además, se presentan los resultados obtenidos con rejillas tradicionales y sub-estructuradas de Ronchi y un análisis de algunos de estos resultados, así como también, las ventajas, desventajas y principales problemas encontrados durante todas las etapas de este trabajo.

# Abstract

This work presents an experimental proposal as a solution to typical problems that appear on the limitations of interferometry with a single visible wavelength. To this end, some alternative solutions are reviewed, the basic concepts and mathematical description of the Ronchi test, and a description of the concept of equivalent wavelength. To do this, some examples have been devised in order to clarify and emphasize the advantage of using a larger wavelength commonly known as equivalent, effective or synthetic wavelength.

Furthermore, we discuss the main computational methods that must be used to generate Ronchigrams with equivalent wavelength. Some of these procedures are applied in the pre-processing stages and provide the ability to control the visibility of the fringes in the final results. Also, we present the results obtained with traditional and sub-structured Ronchi rulings and a comparative analysis of these results. Finally, we discuss advantages, disadvantages and problems encountered during the implementation of the work for the purpose of establishing the possibilities in which this proposal can be applied.

# Dedicatorias

En primer lugar, me gustaría agradecer a todas aquellas personas, profesores, asesores y compañeros que han sido un ejemplo y una guía en mi etapa de aprendizaje en el INAOE. Asimismo, quiero extender un agradecimiento al personal de este instituto que ha ayudado de manera directa a la consecución de este trabajo.

Agradezco profundamente a Dios por estar a mi lado absolutamente en todo momento de mi vida.

Dedico este trabajo principalmente a las siguientes personas, a mis padres José Luis García Vidal y María Luisa Arellano Gutiérrez, por su tiempo para escucharme, soportarme y por brindarme sus invaluable consejos. A mis hermanos Rosalía, José Luis y Guadalupe. Y a mis seres queridos, Naina y Miguelito.

*"Todo cambia de aspecto, empero, al pasar del mundo abstracto a la realidad"*

K. V. Clausewitz, *De la guerra*.

# Índice general

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Pruebas Ópticas . . . . .	1
1.2. Planteamiento del problema . . . . .	3
1.3. Objetivo de la tesis . . . . .	3
1.4. Preliminares . . . . .	4
1.4.1. Alternativas . . . . .	4
1.4.2. Prueba de Ronchi . . . . .	9
1.4.3. Representación de Ronchigramas . . . . .	13
1.4.4. Rejillas clásicas y sub-estructuradas de Ronchi . . . . .	15
<b>2. Longitud de Onda Equivalente y Patrones de Moiré</b>	<b>20</b>
2.1. Longitud de onda equivalente . . . . .	20
2.2. Patrones de Moiré . . . . .	26
2.3. Ronchigramas con longitud de onda equivalente . . . . .	28
<b>3. Procesamiento Digital de Ronchigramas</b>	<b>32</b>
3.1. Eliminación de Ruido en Ronchigramas . . . . .	32
3.1.1. Promediado de imágenes . . . . .	33
3.1.2. Filtro de mediana . . . . .	34
3.2. Mejoramiento de Ronchigramas . . . . .	35
3.2.1. Corrección-gamma . . . . .	35
3.3. Filtraje Pasabajas . . . . .	41
3.4. Ronchigramas con Longitud de Onda Equivalente . . . . .	42

<b>4. Procedimientos y Resultados</b>	<b>46</b>
4.1. Arreglo Experimental . . . . .	46
4.2. Evaluación con Rejillas clásicas y sub-estructuradas . . . . .	50
4.3. Análisis de Datos y Construcción del frente de onda . . . . .	57
4.4. Ventajas y Desventajas . . . . .	59
<b>5. Conclusiones</b>	<b>61</b>
5.1. Conclusiones generales . . . . .	61
5.2. Conclusiones adicionales . . . . .	62
5.3. Contribuciones específicas . . . . .	63
5.4. Trabajos Relacionados y Participación en otras publicaciones . . . . .	65
5.5. Trabajo futuro . . . . .	66
<b>Apéndices</b>	<b>67</b>
<b>A. Ejemplos de Algoritmos</b>	<b>67</b>
A.1. Corrección-gamma . . . . .	67
A.2. Longitud de onda equivalente . . . . .	68
A.3. Filtraje Gaussiano Pasabajas . . . . .	69

# Prefacio

En esta tesis se plantea una propuesta experimental que conjunta la prueba de Ronchi y el concepto de longitud de onda equivalente. En los primeros dos capítulos, para adquirir una idea general de estas técnicas, se revisan los conceptos básicos tanto de la prueba de Ronchi como del concepto de longitud de onda equivalente. De ninguna manera se pretenden tratar todos los aspectos concernientes a éstos métodos a profundidad, no obstante, aquellos involucrados en esta tesis son descritos completamente. El capítulo 3 se centra en los procedimientos del Procesamiento Digital de Imágenes utilizados en el proceso generativo de Ronchigramas con longitud de onda equivalente. El capítulo 4, reúne los conocimientos de los capítulos anteriores y presenta los resultados obtenidos con longitud de onda equivalente para rejillas clásicas y rejillas sub-estructuradas. Por último, se hace un análisis de las ventajas y desventajas que ofrece esta propuesta experimental de modo que el propósito fundamental de la tesis es extender la gama de posibilidades de las pruebas ópticas.

Por otra parte, agradezco al CONACYT por el apoyo brindado durante mis estudios de doctorado con la beca No. 160528 y por el apoyo para realizar una estancia técnica en la Universidad de Santiago de Compostela, España. También agradezco al INAOE por facilitarme todos los medios necesarios para la realización de este trabajo. A mis sinodales, Dr. Alejandro Cornejo Rodríguez, Dr. Alberto Jaramillo Nuñez, Dr. Daniel Malacara Hernández, Dr. Rufino Díaz Uribe y Dr. Agustín Santiago Alvarado por la revisión de este escrito. A mis asesores, Dr. Fermín Granados y Dr. Manuel Campos así como al Dr. Alejandro Cornejo Rodríguez por su apoyo durante este trabajo, mi más sincera gratitud. Finalmente, a mi familia, amigos y a la gente que hizo posible la realización de este trabajo.

Anni García Arellano

Enero, 2012

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Pruebas Ópticas

Hoy en día, existen diversas técnicas de evaluación de superficies ópticas que pueden ser aplicadas en un taller de óptica. Una posible categorización de estos métodos puede ser la siguiente clasificación. Primero, las *pruebas interferométricas*, entre las que suelen ser más empleados los interferómetros de Newton, de Fizeau y de Tychmann-Green; habiendo ciertos sistemas comerciales que fabrican estos productos para evaluar una amplia gama de superficies [11]. Segundo, las *pruebas geométricas*, como la prueba de Foucault, la Prueba de Ronchi o la prueba de Hartmann; algunas de estas pruebas, como lo es la prueba de Ronchi, son muy robustas y debido a ello ampliamente utilizadas en las etapas intermedias de los procesos de fabricación. Finalmente, otro tipo de métodos como el método de Takeda o la ecuación de transporte de irradiancia, que emplean algunos métodos matemáticos para la solución de la ecuación de onda para la evaluación de las superficies ópticas.

Uno de los límites de los métodos previamente mencionados se presenta con superficies que varían su altura de un punto a otro rápidamente, como en el caso de las superficies esféricas, o bien aparece cuando se evalúan superficies en las que aparecen discontinuidades del orden de  $\lambda/4$  [9, 10]. En el primer caso la evaluación de las superficies ópticas contra frentes de onda planos generan una alta densidad de franjas lo cual, algunas veces, hace imposible una adecuada evaluación de tales superficies en estas zonas. Por otra parte, las discontinuidades en una superficie óptica causarán un salto de las franjas de interferencia



sin que podamos decidir correctamente el orden de las franjas en esta zona. Una posible solución a este problema es utilizar longitudes de onda más grandes que las que se usan habitualmente, i.e., más grandes que las del visible.

Una situación de diferente naturaleza de las anteriores que requiere del empleo de longitudes de onda mayores a las del visible se presenta cuando se diseñan y fabrican superficies que trabajen en el infrarojo. Obviamente, existe la posibilidad de utilizar láseres que trabajen en las longitudes de onda deseadas, por ejemplo un laser de  $CO_2$  alrededor de  $10\mu$ ; sin embargo, nos encontraremos con las siguientes desventajas [30]:

- Elementos refractivos ordinarios los cuales no se pueden probar en estas longitudes de onda;
- La radiación en el IR no se puede observar, lo cual aumenta la dificultad experimental;
- Finalmente, se debe tener la óptica necesaria para trabajar en las longitudes del IR.

De donde resulta evidente que alguna alternativa para evaluar estas superficies que pudiera vencer las desventajas mencionadas sería muy útil.

Un ejemplo de lo que se ha dicho previamente, y que es de gran utilidad en la actualidad, es la fabricación de superficies esféricas. Las cuales resultan complicadas para evaluar con los métodos convencionales como ya se ha mencionado anteriormente. Una solución alternativa a este problema que es frecuente encontrar en los talleres de óptica es el uso de “masters” (término común adoptado para denotar una superficie de referencia), que son superficies de alta precisión y con características específicas para la generación de alguna superficie. Esta solución es muy buena cuando se fabrica en serie alguna superficie, pero cuando se requiere de alguna pieza en específico, los costos de producción aumentan considerablemente.

Dada la problemática presentada anteriormente, durante finales de los 60's y principios de los 70's, algunos autores comenzaron a utilizar la combinación de dos longitudes de onda en el visible para registrar objetos con mayor profundidad mediante el uso de técnicas holográficas [16, 32]. Estas ideas fueron rápidamente aplicadas a métodos interferométricos, y su descripción matemática, paralela al desarrollo de distintas propuestas experimentales, dió como resultado el concepto que ahora se conoce como *longitud de onda equivalente, efectiva o sintética* [30]. Polhemus [24], fue el primero en acuñar el concepto de interferometría junto con el de longitud de onda equivalente. La idea subyacente en esta técnica consiste en la

generación de un *batimiento de dos o más ondas*, ya sea análogo o digital, para generar una *respuesta visible*, correspondiente a una única longitud de onda que es más grande que cualquiera de las longitudes de onda empleadas en el procedimiento. Más adelante, en el Capítulo 2 describiremos a detalle este concepto.

## 1.2. Planteamiento del problema

Como se ha mencionado previamente, la evaluación de superficies con ciertas características sigue siendo una problemática a resolver en los talleres de óptica. Aunque existen diversas maneras para tratar este problema muchos de esos métodos resultan ser poco versátiles ya que al cambiar de longitud de onda requieren de ciertos ajustes muy precisos, y también son demasiado sensibles a perturbaciones externas lo cual los hace poco viables como herramienta de un taller de óptica. La búsqueda de otros procedimientos que sean a su vez robustos y versátiles de implementar sigue siendo un campo de estudio en esta área de la óptica. En este trabajo de tesis el problema que se trata es el siguiente: *evaluar superficies ópticas con la prueba de Ronchi y el concepto de longitud de onda equivalente*. La prueba de Ronchi al ser un interferómetro de trayectoria común tiene la ventaja de ser insensible a perturbaciones externas. Además, el cambio de longitud de onda en esta prueba es realizado de manera rápida y sencilla, sin la necesidad de ajustar elementos extras del sistema. Por otra parte, el uso de una pantalla de cristal líquido para emplear las rejillas de Ronchi permite probar la superficie bajo estudio con distintos tipos de rejillas de manera rápida. En particular, en este trabajo estamos interesados en utilizar *rejillas sub-estructuradas*, lo cual permite una evaluación, *in situ*, con distintas resoluciones espaciales de la rejilla, así como con distintas rejillas.

## 1.3. Objetivo de la tesis

En este trabajo de tesis el objetivo principal es utilizar el concepto de longitud de onda equivalente implementado con el uso de rejillas clásicas y sub-estructuradas en la prueba de Ronchi para evaluar la calidad de superficies ópticas. Los objetivos secundarios son los siguientes:

- Implementar el arreglo experimental que nos permita capturar Ronchigramas con dos longitudes de onda en el visible.
- Describir los algoritmos computacionales adecuados para la generación de patrones de Ronchi con longitud de onda equivalente y también para realizar el filtraje conveniente de frecuencias indeseadas.
- Obtener patrones de Ronchi con rejillas tradicionales y rejillas sub-estructuradas utilizando longitud de onda equivalente.
- Reconstruir el frente de onda con los Ronchigramas del paso anterior y comparar los resultados con aquellos de algún interferómetro convencional.

La tesis consta de 5 capítulos. En el Capítulo 1 se expone una idea general de las pruebas ópticas relacionadas con el tema propuesto donde se muestran algunos ejemplos en los que se discuten las limitaciones de estas pruebas. Se presentan los conceptos preliminares de la prueba de Ronchi y de las rejillas clásicas y sub-estructuradas como base de este trabajo. En el Capítulo 2 se describen las ideas principales que sustentan la generación de la longitud de onda equivalente basada en batimientos de ondas, misma que describe a los patrones de Moiré. En el Capítulo 3 describimos a detalle los métodos del Procesamiento Digital de Imágenes que hemos empleado para combinar computacionalmente los patrones de Ronchi. El Capítulo 4 presenta los patrones generados con longitud de onda equivalente, así como también los frentes de onda generados en este trabajo. Por último en las conclusiones (Capítulo 5) se presenta un resumen de los objetivos logrados, las aportaciones de esta tesis, los trabajos derivados, algunas consideraciones sobre el trabajo realizado y posibles investigaciones futuras.

## 1.4. Preliminares

### 1.4.1. Alternativas

En esta sección se describen algunos de los métodos de evaluación de superficies ópticas que utilizan el concepto de longitud de onda equivalente. Se hace énfasis el uso de técnicas holográficas para obtener los patrones con longitud de onda equivalente. Estos procedimientos

tienen sus orígenes en la idea original de Hildebrand [16] de utilizar múltiples fuentes de luz o el uso de diferentes longitudes de onda para la generación de hologramas de objetos con cierta profundidad; este resultado es similar a primero grabar el holograma en un medio con índice  $n_1$  y reconstruirlo en un medio de índice de refracción  $n_2$  [32].

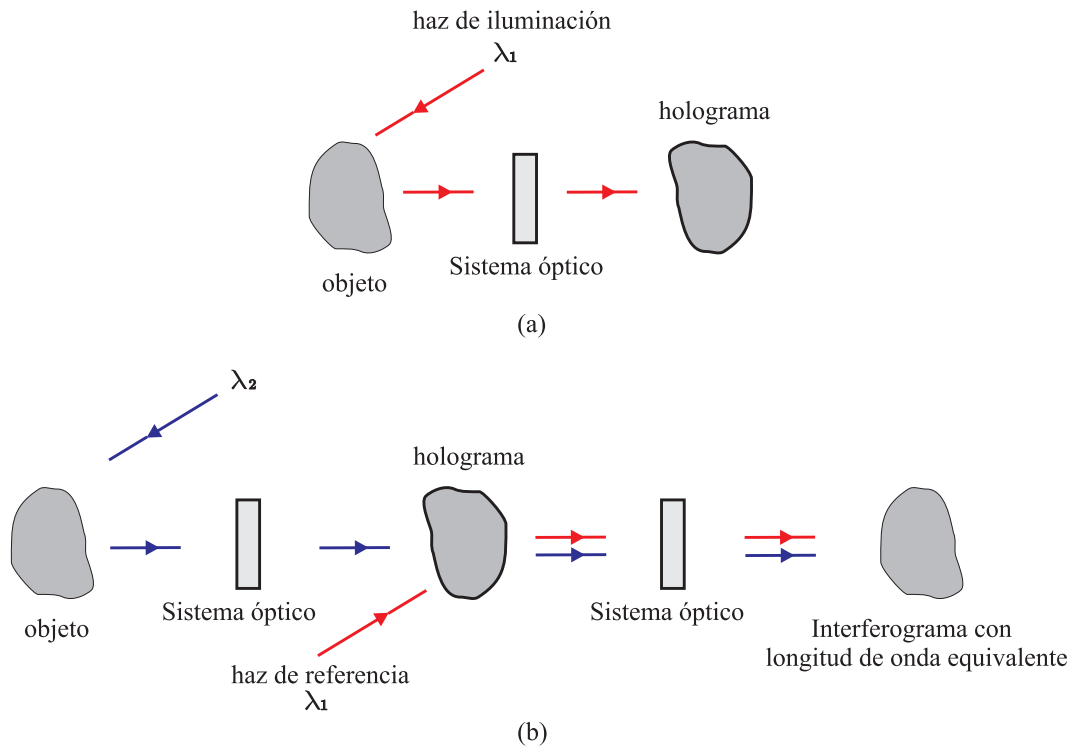


Figura 1.1: Esquema general de la holografía con dos longitudes de onda. (a), Primera etapa, holograma con  $\lambda_1$ . (b), Segunda etapa, iluminación con  $\lambda_2$  e interferencia con el holograma registrado con  $\lambda_1$

La generación de un patrón con longitud de onda equivalente se puede alcanzar de dos maneras[30, 24]; la primera, conocida como *método serial*, consiste en registrar el patrón de franjas que se obtiene al evaluar un elemento óptico utilizando la longitud de onda  $\lambda_1$ . Este registro, que como se verá más adelante, puede ser un holograma o un medio electrónico, se coloca en el arreglo experimental en la misma posición en la que se hizo el registro con  $\lambda_1$ ; posteriormente, el objeto se ilumina con  $\lambda_2$  y el patrón de franjas que resulta de esta evaluación se hace interferir con el patrón generado con  $\lambda_1$ . En este caso, un único laser puede ser utilizado junto con algún elemento o arreglo óptico, como un prisma, para seleccionar

distintas longitudes de onda; no obstante, algunos arreglos requieren de elementos ópticos extra, como espejos u otros elementos, para direccionar el haz con  $\lambda_2$  para que éste tenga la misma dirección que se tenía del haz con  $\lambda_1$  [31]. Un esquema general que puede servir para ver con claridad lo que se ha dicho hasta el momento se presenta en la Fig. 1.1; en el cual, el camino del haz de iluminación será para  $\lambda_1$  y  $\lambda_2$ , mientras que el camino del haz de referencia será para alguna de las dos longitudes de onda antes mencionadas.

Un arreglo más específico de este tipo de procedimiento (método serial) se muestra en la Fig. 1.2, en donde se tiene un laser de Argón sintonizable para seleccionar  $\lambda_1$  o  $\lambda_2$ . No obstante, cuando no se cuenta con un laser sintonizable, el uso de otros elementos ópticos para seleccionar dos longitudes de onda, requerirá que algunos de los espejos de la Fig. 1.2 sean ajustados para que el haz de referencia y el haz que proviene de la superficie de evaluación, coincidan tanto para  $\lambda_1$  y  $\lambda_2$ , y de esta manera evitar errores por la diferente dirección que toma cada longitud de onda. Otra característica en este tipo de arreglos es el empleo de filtros pasabajas (pinholes) colocados después del holograma; esto se debe al hecho de que en este procedimiento se producen varias frecuencias, distintas a la de la longitud de onda equivalente, en el mismo patrón, ver Sec. 2.3.

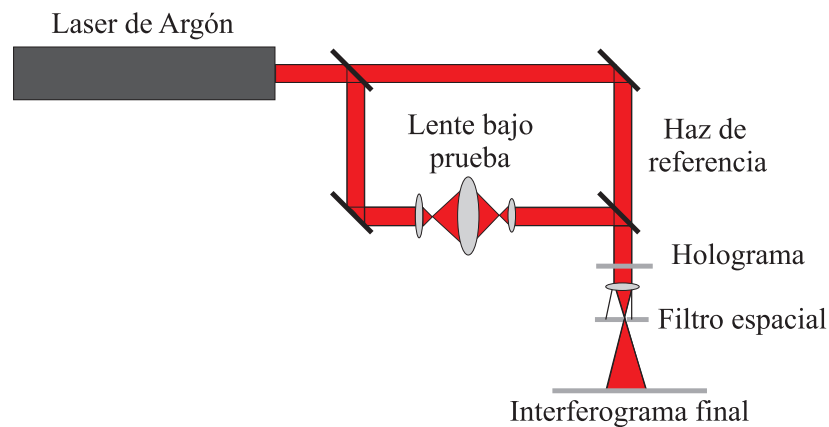


Figura 1.2: Arreglo experimental para holografía con longitud de onda equivalente con el procedimiento serial.

Un ejemplo de arreglos con láseres sintonizables se presenta en la Fig. 1.3 [19]. En esta propuesta se utilizaron nuevos dispositivos disitintos a los tradicionales para generar hologramas. Como podemos observar, se emplea una cámara termoplástica la cual tiene la capacidad de registrar y, más importante, de generar el holograma que se graba en ella. Esto tiene la

ventaja sobre la holografía tradicional de evitar mover el holograma de su posición para revelarlo; pues, con holografía tradicional, mover el holograma es una desventaja ya que después de la etapa de revelado, se debe colocar exactamente en la misma posición en la cual se registro  $\lambda_1$  para no introducir errores debido al posicionamiento. Otra característica importante de este arreglo es el uso de un láser de tintura sintonizable; que tiene la capacidad de poder sintonizar distintas longitudes de onda. Sin embargo, una posible desventaja que podría tener es que necesita ser alimentado por una fuente láser, en este caso, en el arreglo de la Fig. 1.3 se utiliza un laser de Argón. Aunque este arreglo presenta una verdadera mejora sobre anteriores propuestas, los espejos aún deben ser reorientados para que el registro con la segunda longitud de onda  $\lambda_2$  se proyecte de manera correcta sobre la cámara termoplástica.

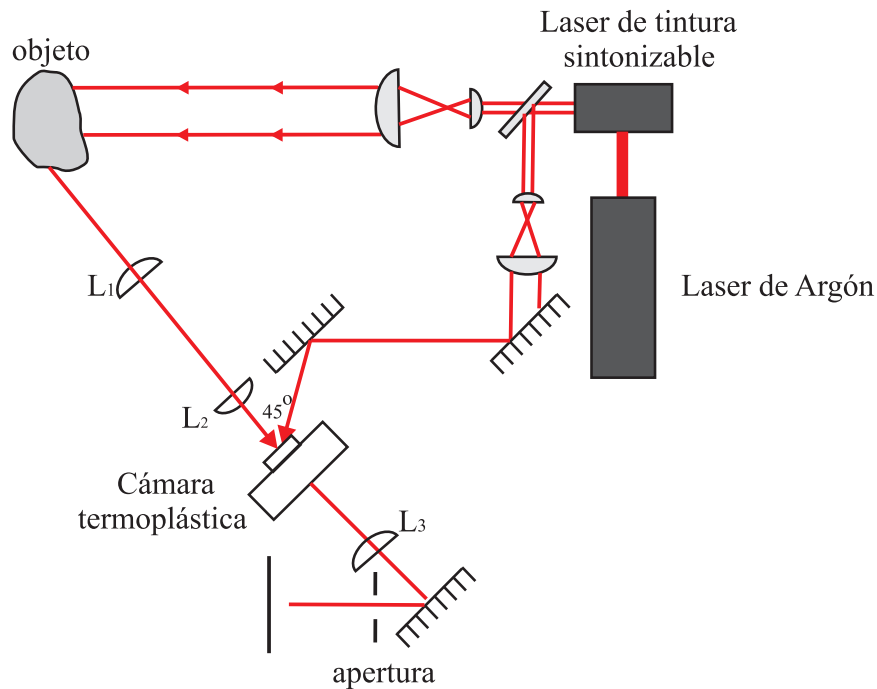


Figura 1.3: Uso de una cámara termoplástica y de un láser de tintura sintonizable para la evaluación de superficies ópticas con longitud de onda equivalente [19].

El *método paralelo*, que en cierto modo coincide con el empleo de múltiples fuentes, consiste en utilizar dos láseres diferentes y hacer que los haces para  $\lambda_1$  y  $\lambda_2$  viajen por el mismo camino; de modo que la superficie que se está evaluando sea iluminada por ambas longitudes de onda y los patrones generados para cada una de ellas sean combinados para

generar el patrón con la longitud de onda equivalente. En la Fig. 1.4 se muestra un arreglo que utiliza este procedimiento para la evaluación de superficies. Es importante señalar, que

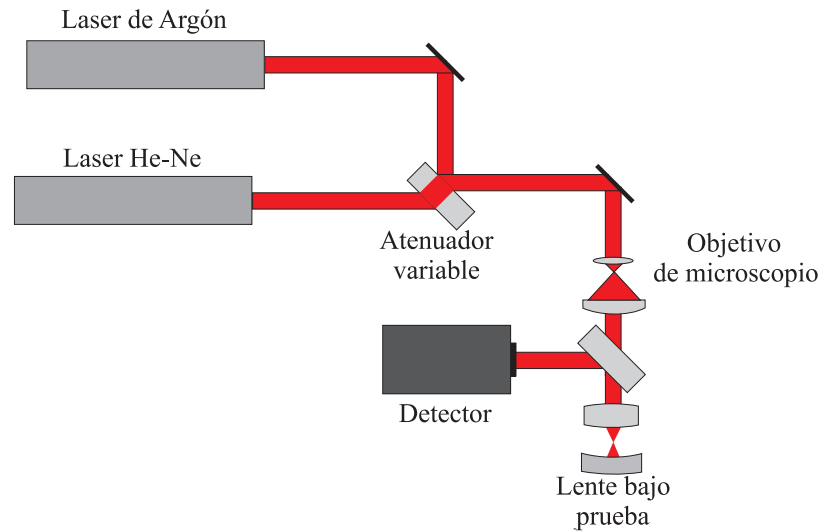


Figura 1.4: Arreglo experimental para interferometría con longitud de onda equivalente con el procedimiento paralelo.

cuando se utilizan dispositivos electrónicos para el registro de los patrones hay que tener en cuenta que algunos de ellos sumarán los patrones correspondientes a ambas longitudes de onda y por lo tanto no generarán un batimiento de esas ondas. No obstante, si el sistema de registro fuese un holograma o una fotografía del patrón mezclado entonces observaríamos el patrón esperado. Otro punto que es importante en estos arreglos, y que no se muestra explícitamente en la Fig. 1.4, es el filtraje espacial después de la combinación de ambos patrones de franjas; pues, de la misma manera que el método serial, la combinación de patrones generará distintas frecuencias de las cuales, la longitud de onda equivalente genera las más bajas, por ello, el filtro a utilizar es del tipo pasabajos. Más adelante se discute como seleccionar un filtro digital adecuado para seleccionar las frecuencias que se generan en los batimientos de ondas.

Los dos procedimientos presentados anteriormente constituyen la base de uso del concepto de longitud de onda equivalente. Como podemos observar en el método paralelo, la holografía fue sustituida por diversos componentes electrónicos para realizar el registro de los patrones de franjas. En las primeras aplicaciones que se hicieron en pruebas ópticas utilizando este concepto incluían el uso de hologramas. Pero, con el desarrollo de nuevos dispositivos

electrónicos en la década de los 70's la holografía fue sustituida por estos dispositivos. En otros trabajos [7, 8], se ha optado por registrar cada patrón independientemente y después realizar la combinación de ambos de manera digital; obviamente esto se debió también al creciente desarrollo de la tecnología de las computadoras en la misma década.

### 1.4.2. Prueba de Ronchi

Debido a sus características, la *prueba de Ronchi* ha sido utilizada ampliamente durante muchos años [6]. Esta técnica es generalmente utilizada en procesos de fabricación de superficies ópticas, donde es muy útil para predecir cualitativamente, y con gran precisión, la calidad óptica de la superficie o sistema óptico que se construye. Sus distintas variaciones para probar la calidad óptica de diferentes superficies, como espejos, lentes y hasta sistemas convergentes ha conservado esta técnica en muchos talleres de óptica. Específicamente, mediante esta prueba obtenemos información de la *aberración transversal* de la superficie bajo prueba [6]. Para entenderla mejor podemos utilizar la Fig. 1.5, en donde podemos observar

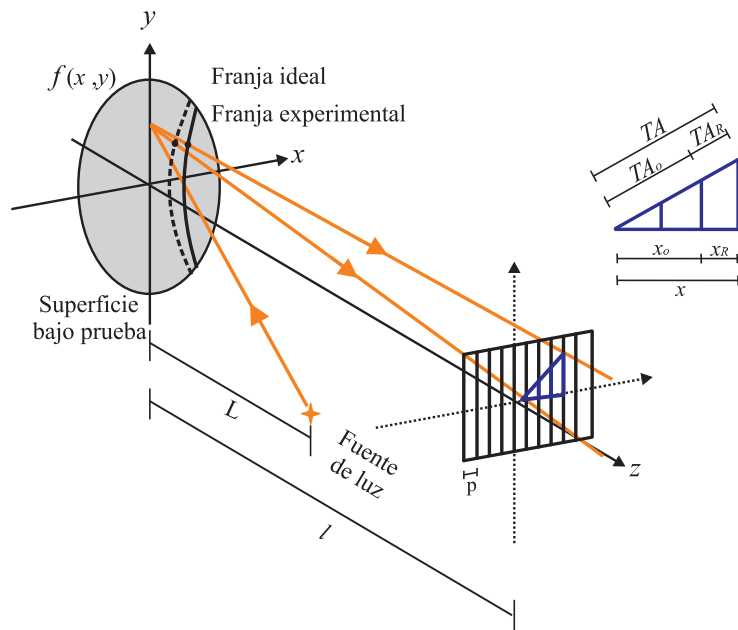


Figura 1.5: Descripción de la aberración transversal medida por la prueba de Ronchi.

que la aberración transversal corresponde a una diferencia entre la posición que tomaría un rayo ideal en el plano de la rejilla (en el sentido de que la superficie tuviese la forma ge-



ométrica deseada), y la posición del rayo que es reflejado físicamente por la superficie. Desde otro punto de vista, sería la diferencia entre la posición de una franja ideal y aquella de la franja real a lo largo de la dirección transversal a las franjas.

Existen dos posibilidades para analizar esta prueba. La primera toma en cuenta el punto de vista de la óptica geométrica, el cual considera la proyección de las franjas de una rejilla de cierta frecuencia sobre la superficie bajo análisis (comúnmente llamada *rejilla de Ronchi*, y que en muchas ocasiones hace alusión a la misma prueba), la cual contiene franjas equidistantes y paralelas. Entonces, desde este punto de vista, lo que se observa a través de la rejilla es un patrón que se obtiene al combinar las franjas reflejadas, provenientes de la superficie, sobre la misma rejilla, lo cual generará lo que se conoce como un *Ronchigrama*. El segundo punto de vista, el de la óptica física, describe a esta prueba como un *interferómetro de desplazamiento lateral* [6]; en donde la rejilla de Ronchi actúa como una rejilla de difracción la cual difracta la pupila de salida de la superficie bajo análisis, siendo aquellos órdenes que se superponen los que generan la interferencia. Específicamente, serán aquellas zonas de superposición donde observaremos franjas de interferencia que en realidad son Ronchigramas. Este efecto puede observarse claramente en las Figs. 1.6 y 1.7, en donde se presenta tanto la

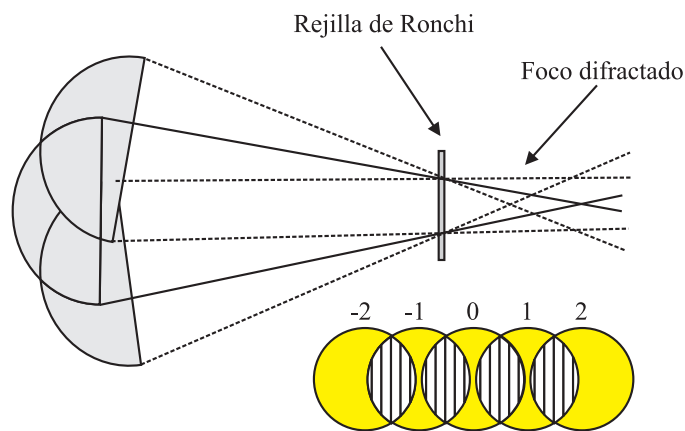


Figura 1.6: Algunos órdenes de difracción generados en la prueba de Ronchi.

descripción esquemática como la experimental de este efecto, respectivamente.

El tratamiento matemático para comprender la prueba de Ronchi como un *Interferómetro de Desplazamiento Lateral* está basado en la teoría de Fourier [2, 26]. De acuerdo a la Fig. 1.8, la descripción matemática de la prueba de Ronchi es la siguiente.  $F_0(x_0, y_0)$  representa la

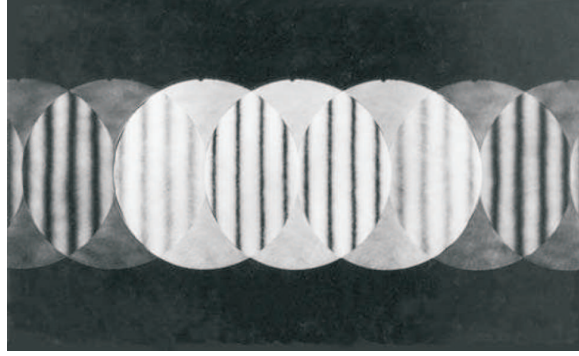


Figura 1.7: Imagen experimental que muestra a la prueba de Ronchi como un interferómetro de desplazamiento lateral; imagen tomada del Optical Shop Testing 3ra. ed.

función de la pupila de salida, la cual está definida como [2]

$$F_0(x_0, y_0) = \begin{cases} A_0(x_0, y_0)e^{ikW(x_0, y_0)} & \text{para } (x_0, y_0) \in \text{apertura,} \\ 0 & \text{para } (x_0, y_0) \notin \text{apertura,} \end{cases} \quad (1.1)$$

en donde,  $A_0(x_0, y_0)$  es la distribución de amplitud del frente de onda emergente de la apertura y  $W(x_0, y_0)$  es una función de fase que tiene información de la *deformación del frente de onda* de cada punto  $(x_0, y_0)$  de la superficie bajo prueba. Este análisis se puede comprender como las deformaciones del frente de onda descritas por  $F_0(x_0, y_0)$  medidas respecto a una esfera ideal de radio de curvatura  $r$  con centro en la rejilla de Ronchi.

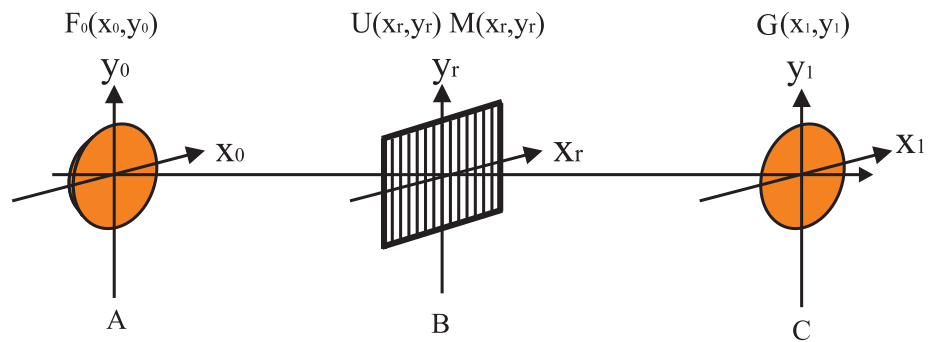


Figura 1.8: Planos importantes para describir la prueba de Ronchi con la teoría de Fourier. Plano A: pupila de salida de la superficie bajo prueba. Plano B: modulación frecuencial. Plano C: plano imagen.

Al evaluar el campo óptico inmediatamente antes de la rejilla de Ronchi se tiene el campo

difractado  $U(x_r, y_r)$  descrito por la siguiente expresión

$$U(x_r, y_r) = \int \int_{-\infty}^{\infty} F_0(x_0, y_0) \exp \left[ -i \frac{2\pi}{\lambda r} (x_r x_0 + y_r y_0) \right] dx_0 dy_0. \quad (1.2)$$

En este análisis, la rejilla de Ronchi actúa como un dispositivo modulador que corresponde a un *filtro espacial* denotado por  $M(x_r, y_r)$ , de modo que el campo inmediatamente posterior a la rejilla será la multiplicación  $U(x_r, y_r)M(x_r, y_r)$ . De manera particular, una rejilla de Ronchi se puede expresar como una serie de Fourier. Si la rejilla consiste de franjas rectas, paralelas y equidistantes la podemos escribir como [2, 6]

$$M(x_r, y_r) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} B_n \exp \left( i \frac{2\pi n}{p} x_r \right), \quad (1.3)$$

en donde,  $p$  es el periodo de la rejilla y los coeficientes  $B_n$  están asociados a la forma de la rejilla.

En el plano de observación tendremos el campo  $G(x_1, y_1)$ , que corresponde a la *transformada inversa de Fourier* del producto  $U(x_r, y_r)M(x_r, y_r)$ , i.e.,

$$G(x_1, y_1) = \int \int_{-\infty}^{\infty} U(x_r, y_r)M(x_r, y_r) \exp \left[ i \frac{2\pi}{\lambda r} (x_r x_1 + y_r y_1) \right] dx_r dy_r. \quad (1.4)$$

Al sustituir  $M(x_r, y_r)$  en la Ec. (1.4) y ordenando la expresión se tiene

$$G(x_1, y_1) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} B_n \int \int_{-\infty}^{\infty} U(x_r, y_r) \exp \left\{ i \frac{2\pi}{\lambda r} \left[ x_r \left( x_1 + \frac{\lambda r n}{p} \right) + y_r y_1 \right] \right\} dx_r dy_r. \quad (1.5)$$

Como  $U(x_r, y_r)$  es la transformada de Fourier de  $F_0(x_0, y_0)$ , entonces, por la propiedad de desplazamiento de frecuencia de la transformada, la evaluación de la Ec. (1.5) es

$$G(x_1, y_1) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} B_n F_0 \left( x_1 + \frac{\lambda r n}{p}, y_1 \right), \quad (1.6)$$

la cual representa el campo en el plano imagen de la Fig. 1.8. La intensidad en el plano imagen está dada por

$$I(x_1, y_1) = G(x_1, y_1)G^*(x_1, y_1), \quad (1.7)$$

en donde,  $G^*(x_1, y_1)$  denota el conjugado de  $G(x_1, y_1)$ . Dependiendo de la forma de la rejilla se tiene un número de imágenes diferente en el patrón de intensidad como en el caso en el que

la rejilla está descrita por una función cosenoidal la cual genera tres imágenes desplazadas lateralmente [6]. En la multiplicación descrita por la Ec. (1.7) se puede observar que aparece la multiplicación entre términos cruzados, sin embargo, para  $\frac{2\pi}{p} > 1$ , dominio de la alta frecuencia, la importancia de los términos cruzados resulta mínima en el patrón de intensidad [2]. En estos casos, el patrón de intensidad final consiste de un conjunto de imágenes de la pupila de salida desplazadas lateralmente por la cantidad  $\frac{\lambda r}{p}$ . Debido a que  $n \in \mathbb{Z}$  estas imágenes se encontrarán a la derecha e izquierda de la imagen de la pupila de salida, Fig. 1.7. Pero esto no es más que el resultado de la Rejilla de Ronchi actuando como una rejilla de difracción. En la práctica, es común que el periodo de nuestra rejilla no sea tan alto de modo que los órdenes de difracción se observan más cercanos unos a otros a diferencia de los mostrados en la Fig. 1.7.

### 1.4.3. Representación de Ronchigramas

En esta sección se presenta una alternativa para representar cualquier Ronchigrama capturado con alguna longitud de onda  $\lambda$ . Como sabemos, un interferograma se puede escribir de la forma [22]

$$I(x, y) = I_0 + \beta \cos \left[ \frac{2\pi}{\lambda} DCO(x, y) \right], \quad (1.8)$$

en donde,  $DCO(x, y)$  es la *Diferencia de Camino Óptico* entre los dos haces que interfieren. En un interferómetro de desplazamiento lateral, el  $DCO$  está dado por

$$DCO(x, y) = W(x, y) - W(x + \Delta x, y) = \frac{W(x, y) - W(x + \Delta x, y)}{\Delta x} \Delta x, \quad (1.9)$$

Sí  $\Delta x$  es suficientemente pequeño, la Ec. (1.9) se puede definir como

$$DCO(x, y) = \frac{\partial W(x, y)}{\partial x} \Delta x = \alpha(x, y) \Delta x, \quad (1.10)$$

en donde,  $\alpha(x, y)$  es el *frente de onda de pendientes* de la superficie [22],  $\Delta x$  es el desplazamiento lateral en la dirección  $x$  y  $W(x, y)$  representa, como antes, el frente de onda aberrado. Como se menciono anteriormente, la prueba de Ronchi puede ser entendida como un interferómetro de desplazamiento lateral de donde se infiere que cualquier Ronchigrama puede ser descrito mediante la Ec. (1.8). Entonces, utilizando la Ec. (1.10) podemos escribir la Ec. (1.8) como

$$I(x, y) = I_0 + \beta \cos \left[ \frac{2\pi}{\lambda} \alpha(x, y) \Delta x \right], \quad (1.11)$$

que puede ser escrita como [22]

$$I(x, y) = I_0 + \beta \cos \left[ \frac{2\pi}{\lambda_q} \alpha(x, y) \right], \quad (1.12)$$

en donde,  $\lambda_q = \frac{\lambda}{\Delta x}$ , es un factor de escalamiento en esta representación del Ronchigramma. El valor de  $\Delta x$  es el desplazamiento lateral  $\frac{\lambda r}{p}$ , presentado en la Ec. (1.6);  $r$  es el radio de curvatura paraxial de la superficie óptica bajo prueba y  $\lambda$  es la longitud de onda con la que se registro el Ronchigramma. Aunque el resultado anterior es válido, debemos considerar el hecho de que en muchas ocasiones cuando se analiza un interferograma resulta ser más conveniente normalizar el radio de la pupila de salida de la superficie de prueba a uno. De modo que tendremos que dividir  $\Delta x$  por el máximo radio de la superficie de prueba (la mitad del diámetro de la superficie,  $D/2$ ) para normalizar nuestro Ronchigramma descrito por la Ec. (1.12). De modo que tendremos

$$\Delta' x = \frac{\Delta x}{D/2} = \frac{2\lambda r}{pD}, \quad (1.13)$$

Después de esta normalización, la cantidad  $\lambda_q$  se redefine como

$$\lambda_q = \frac{\lambda}{\Delta' x} = \frac{pD}{2r}. \quad (1.14)$$

Supongamos que hemos tomado dos interferogramas con diferentes longitudes de onda  $\lambda_1$  y  $\lambda_2$ , de la misma superficie. Entonces, los parámetros  $D$ ,  $p$  y  $r$  deben ser los mismos para ambos Ronchigramas. Desde el punto de vista de la óptica geométrica se concluye que ambos Ronchigramas son iguales ya que la Ec. (1.14) es la misma en ambos casos [22]; dicho en otras palabras, la proyección de la rejilla con periodo  $p$  es la misma para cualquier longitud de onda. Sin embargo, para generar Ronchigramas con longitud de onda equivalente es necesario que exista un cambio en la separación de las franjas del Ronchigramma al evaluar la superficie con distintas longitudes de onda ya que este cambio de fase es el que permite generar los patrones con longitud de onda equivalente [10]. De acuerdo con [5], al utilizar rejillas de periodos pequeños, o lo que es igual, de altas frecuencias, se pasa a la descripción de la prueba de Ronchi desde el punto de vista de la óptica física en donde la distancia entre franjas del Ronchigramma como función de la longitud de onda se hace patente. Bajo estas condiciones, en vez de utilizar el periodo de la rejilla en la descripción del Ronchigramma se

utiliza el periodo de las franjas en el Ronchigrama, representado por la letra  $d$  y definido como

$$d(\lambda) = \lambda l/p, \quad (1.15)$$

en donde  $l$ , como se muestra en la Fig. 1.5, es la distancia entre la superficie bajo prueba y la rejilla de Ronchi, y  $d$  representa el periodo entre franjas del Ronchigrama. De modo que la cantidad  $\lambda_q$ , se redefine como

$$\lambda_q = \frac{d(\lambda)D}{2r}. \quad (1.16)$$

De esta manera, se amplia la representación para dos Ronchigramas registrados con la misma rejilla pero con distintas longitudes de onda, en donde la diferencia entre ambos estriba en el periodo de sus franjas de acuerdo a lo dicho previamente.

#### 1.4.4. Rejillas clásicas y sub-estructuradas de Ronchi

##### Rejillas clásicas

En esta sección se presenta una descripción matemática de los tipos de rejillas utilizados en este trabajo. Con anterioridad hemos mencionado la descripción de las rejillas tradicionales de Ronchi en la Sección 1.4.2. Recordemos que una rejilla de Ronchi consiste de franjas rectas, paralelas y equidistantes, lo cual se expresa por la siguiente serie de Fourier

$$M(x_r, y_r) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} B_n \exp\left(i\frac{2\pi n}{p}x_r\right), \quad (1.17)$$

en donde,  $p$  es el periodo de la rejilla y los términos  $B_n$  son los coeficientes de la serie asociados a la forma de la rejilla.

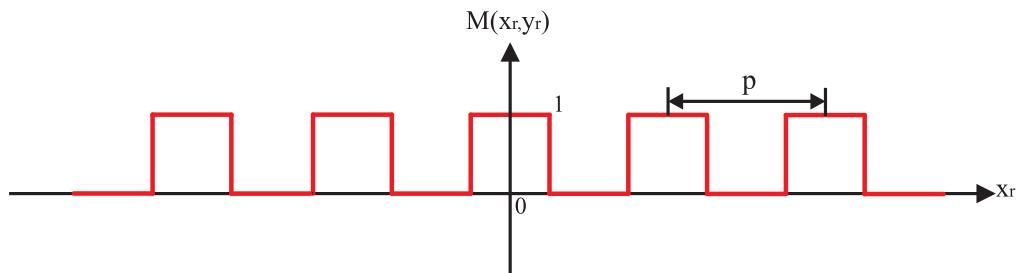


Figura 1.9: Secuencia de una rejilla tradicional, binaria de Ronchi.

En este trabajo se consideran rejillas binarias de Ronchi como las que se muestran en la Fig. 1.9. Para este tipo de rejillas los coeficientes  $B_n$  están definidos de la siguiente manera [6]

$$B_n = (-1)^n \frac{\sin(n\pi/2)}{n\pi}, \quad (1.18)$$

de modo que, el campo en el plano imagen producido por una rejilla binaria de este tipo está dado por

$$G(x_1, y_1) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} (-1)^n \frac{\sin(n\pi/2)}{n\pi} F_0 \left( x_1 + \frac{\lambda r n}{p}, y_1 \right). \quad (1.19)$$

En este trabajo, al utilizar una pantalla de cristal líquido se requiere programar algún algoritmo para implementar las rejillas de Ronchi. Esto se puede lograr utilizando las Ecs. (1.17) y (1.18) para un cierto número de términos  $n$ , o bien, dada la sencillez de la rejilla binaria se puede repetir la secuencia binaria  $(\dots; 1, 0; 1, 0; \dots)$  controlando el ancho de cada franja de la rejilla para controlar el número de líneas generadas en la imagen de la rejilla.

### Rejillas sub-estructuradas

Las secuencias sub-estructuradas originalmente fueron desarrolladas en el área del Procesamiento Digital de Señales y utilizadas como métodos de codificación de distintas señales para obtener una detectabilidad óptima sin pérdidas de resolución de tiempo. La aplicación de las rejillas sub-estructuradas a las pruebas ópticas busca incrementar la resolución espacial de la prueba y en consecuencia obtener información más precisa de la superficie que se analiza [4, 29]. Hecho análogo a la interferencia de múltiples haces que genera bandas de interferencia más angostas que las bandas producidas por dos haces.

A diferencia de las rejillas tradicionales que están compuestas por una línea blanca y una oscura de cierto tamaño, el periodo de una rejilla sub-estructurada consiste de una secuencia de líneas blancas u oscuras, todas del mismo tamaño. Dicho en otras palabras, una rejilla tradicional será la secuencia  $(\dots; 1, 0; 1, 0; 1, 0; \dots)$ , mientras que una rejilla sub-estructurada puede ser, por ejemplo, una secuencia dada por  $(\dots; 0; 1, 1, 1, 0, 0; 1, 1, 1, 0, 0; 1, \dots)$ . Supongamos que cada línea ocupa un pixel de la pantalla con la que la estemos desplegando; entonces, el periodo de una rejilla tradicional ocupara como mínimo 2 pixeles. Por otro lado, el periodo del ejemplo de rejilla sub-estructurada mencionado anteriormente, ocupara como mínimo 5 pixeles.

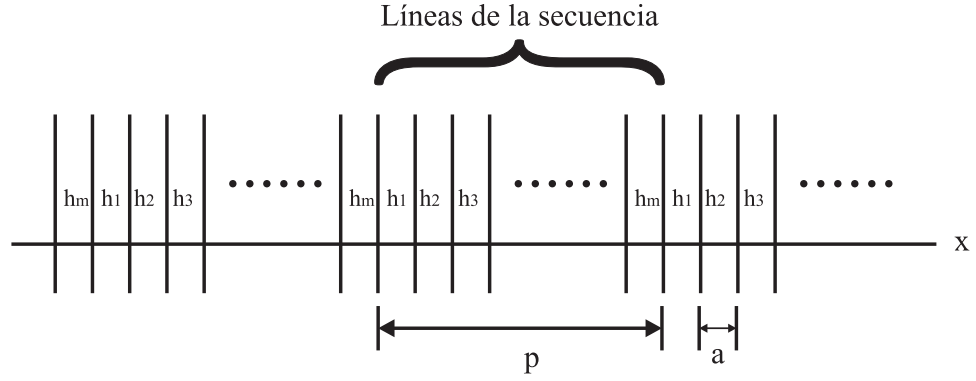


Figura 1.10: Secuencia sub-estructurada.

Cualquier rejilla sub-estructurada puede ser vista como la secuencia presentada en la Fig. 1.10. En donde cada periodo de la rejilla, de ancho  $p$ , está compuesto de una secuencia de  $m$  bandas de igual ancho  $a$  con transmitancia  $t_j$ . Cada línea será blanca u oscura dependiendo de su posición en la secuencia de codificación utilizada. Entonces, si organizamos serialmente distintas secuencias se formará una secuencia binaria periódica de la forma

$$\dots t_m; t_1, t_2, t_3, \dots, t_m; t_1, t_2, t_3, \dots \quad (1.20)$$

en donde,  $t_i \in \{0, 1\}$ . Este tipo de secuencias es conocido como *secuencias de tipo Katyl* debido al autor que las propuso. Cada valor  $t_i$  se define de acuerdo a la posición de los elementos  $h_i$  de la siguiente manera [18]

$$t_i = \frac{1}{2}(1 + h_i), \quad (1.21)$$

en donde  $h_i \in \{-1, 1\}$ . De esta manera, la función de transmisión  $T(x)$  de la rejilla estará dada por [18]

$$T(x) = \frac{1}{2} \left[ 1 + \sum_{k=-\infty}^{\infty} h(x - kp) \right], \quad (1.22)$$

en donde, la forma de la función  $h(x)$  está compuesta de  $m$  funciones rectángulo dadas por [18]

$$h(x) = \sum_{j=1}^{\infty} \text{Rect}[x - (j - 1)a]. \quad (1.23)$$

Cuando el número de bandas con valor uno en una secuencia de Katyl es mayor que el número de líneas con valor cero se dice comúnmente que la secuencia es positiva, mientras que



en el caso contrario se dice que es negativa. En [4] se presentan secuencias para generar rejillas de 5 y 7 bits como alternativa de las rejillas tradicionales de Ronchi para la evaluación de superficies ópticas; estas secuencias se presentan en la Fig. 1.11. Para 5 bits las secuencias

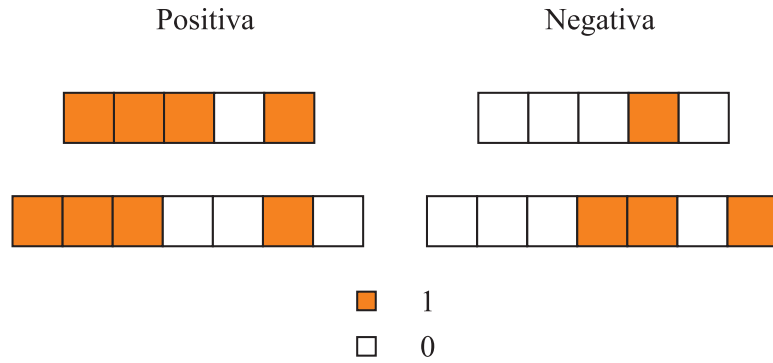


Figura 1.11: Secuencias sub-estructurada de 5 y 7 bits, positivas y negativas.

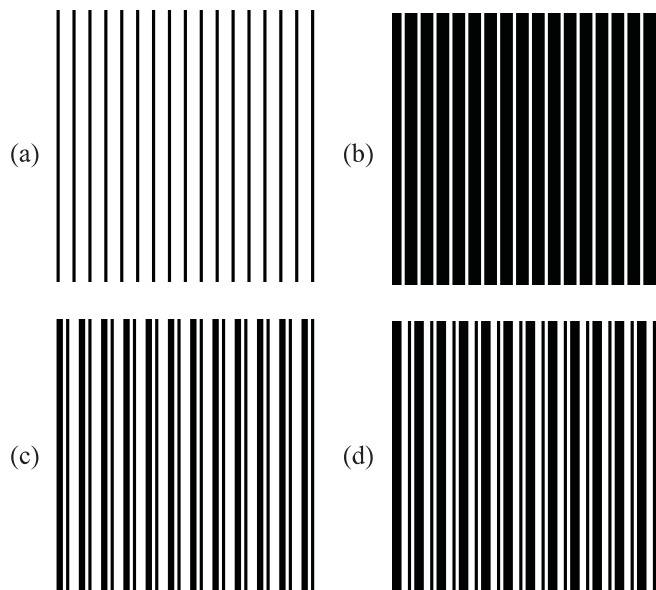


Figura 1.12: Rejillas sub-estructuradas. (a): positiva de 5 bits, (b): negativa de 5 bits, (c): positiva de 7 bits y (d): negativa de 7 bits.

positiva y negativa son,  $(1, 1, 1, 0, 1)$  y  $(0, 0, 0, 1, 0)$ , respectivamente. Para 7 bits se tiene  $(1, 1, 1, 0, 0, 1, 0)$  y  $(0, 0, 0, 1, 1, 0, 1)$ . En la Fig. 1.12 se presentan las rejillas sub-estructuradas que forman estas secuencias, las cuales son mostradas en la Fig. 1.11.

Además de las secuencias sub-estructuradas, otra manera de entender las rejillas sub-estructuradas es como la combinación de dos o más rejillas binarias de diferentes frecuencias [18, 10]. Aunque en este trabajo se utilizan las secuencias de Katyl previamente descritas, a continuación se presenta un ejemplo computacional como alternativa para la generación de rejillas sub-estructuradas. En la Fig. 1.13 se presenta la combinación de dos rejillas binarias de distinta frecuencia para generar una rejilla sub-estructurada. Cuando estas rejillas se combinan mediante la operación lógica AND, el resultado que se tiene es una rejilla sub-estructurada del tipo negativa. Por otro lado, para la generación de una rejilla sub-estructurada positiva, se debe utilizar el operador lógico OR. De esta manera la rejilla sub-estructurada es binaria. Entonces, esta nueva rejilla puede ser combinada nuevamente (con alguna otra rejilla binaria de distinta frecuencia) para generar una nueva rejilla sub-estructurada; de modo que, este procedimiento puede ser aplicado sucesivamente para generar distintas rejillas sub-estructuradas.

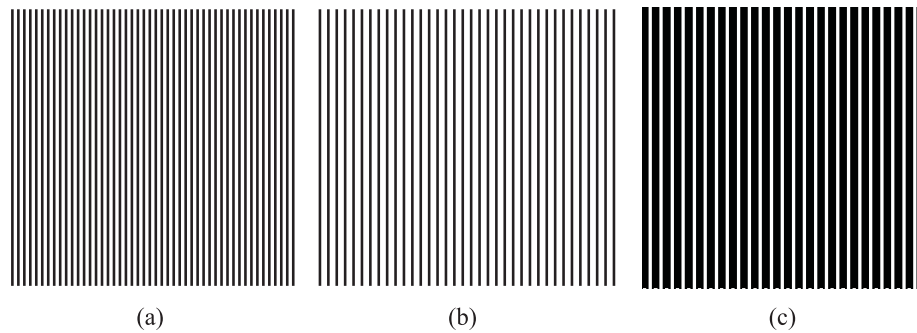


Figura 1.13: ejemplo de la generación de una rejilla sub-estructurada negativa mediante la combinación de dos rejillas clásicas utilizando la operación lógica AND.

# Capítulo 2

## Longitud de Onda Equivalente y Patrones de Moiré

### 2.1. Longitud de onda equivalente

Como se menciona en el Cap. 1, la interferometría con una longitud de onda presenta ciertas limitaciones cuando se evalúan superficies que varían rápidamente su altura de un punto a otro o cuando en la superficie aparecen discontinuidades del orden de  $\lambda/4$  [9, 10]. En el primer caso el número de franjas generado para una  $\lambda$  del visible es muy grande; en ocasiones este número puede ser tan grande que superará la resolución de las cámaras CCD. Este es el caso de superficies como las asféricas que requieren la generación de frentes de onda con características similares a la superficie bajo prueba; obviamente el problema en este caso resulta ser la generación del frente de onda de referencia [20]. Por otro lado, cuando aparecen discontinuidades en una superficie mayores o iguales que  $\lambda/4$  tendremos la incertidumbre de conocer a detalle el orden de la franja que aparece debido a estas discontinuidades.

Para tener una idea más clara de los límites que tiene la interferometría con una longitud de onda en las Figs. 2.1, 2.2 y 2.3 se presentan los resultados de algunas simulaciones computacionales que mediante el interferómetro de Newton plantean las limitaciones para interferometría con una longitud de onda. La intensidad en el interferómetro de Newton para las simulaciones está dada por [21]

$$I(x, y) = 2[1 + \cos(\delta)], \quad \delta = \frac{4\pi}{\lambda}d(x, y) + \pi, \quad (2.1)$$

en donde,  $d$  es la distancia que existe entre la superficie que se evalúa y la superficie de referencia en el punto  $(x, y)$ . En la Fig. 2.1 se presenta un ejemplo en donde se tiene una superficie parabólica con altura alrededor de 10 longitudes de onda para  $\lambda = 632.8$  nm. Esta superficie se probará contra la superficie plana que aparece a la derecha de la misma figura. En

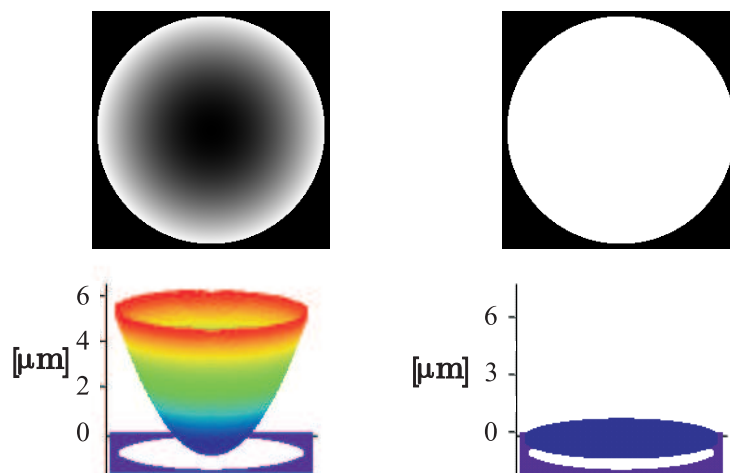


Figura 2.1: Superficie parabólica vs superficie plana en el interferómetro de Newton.

la Fig. 2.2 se presentan los interferogramas para ésta superficie utilizando distintas longitudes de onda. El primero utiliza una  $\lambda_1 = 632.8$  nm; mientras que el segundo interferograma se simuló para  $\lambda_2 = 5\lambda_1 = 3164$  nm. Como se puede observar en esta figura, el número de

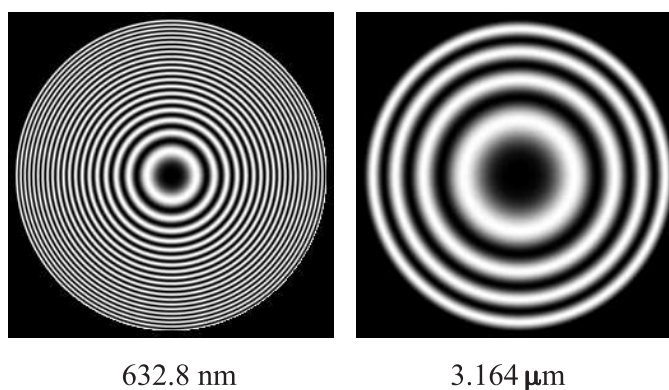


Figura 2.2: Superficie parabólica analizada con dos longitudes de onda;  $\lambda_1 = 632.8$  nm y  $\lambda_2 = 3164$  nm

franjias se reduce para una longitud de onda más grande. Si se observa con detenimiento la Ec. (2.1) este resultado es esperado, pues dada alguna superficie, la frecuencia de las franjas de interferencia producidas por el término cosenoidal de la intensidad  $I(x, y)$  es directamente proporcional a la cantidad  $\frac{1}{\lambda}$ ; de modo que al utilizar una longitud de onda mayor la frecuencia de las franjas en el interferograma disminuirá. En otras palabras, utilizando longitudes de onda más grandes obtendremos menos franjas en nuestro interferograma. Este resultado no es particular del Interferómetro de Newton, pues en sí, la interferometría en general se describe por alguna función  $I(x, y)$  que contiene una función cosenoidal en donde el término de fase  $\delta$  es siempre inversamente proporcional a  $\lambda$ .

En general, si utilizamos una  $\lambda_2$  mayor que  $\lambda_1$  para evaluar alguna superficie, el número de franjas será reducido, aproximadamente, por la razón [30]

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_2}. \quad (2.2)$$

En el ejemplo anterior, tenemos  $\lambda_2 = 3.164\mu\text{m}$  y  $\lambda_1 = 0.6328\mu\text{m}$ , entonces la cantidad de franjas generadas con  $\lambda_1$  sería reducida por  $1/5$  con  $\lambda_2$ . Lo cual se comprueba en la Fig. 2.2, pues con  $\lambda_2 = 3.164\mu\text{m}$  tenemos  $1/5$ , 4 franjas, de las que obtenemos con  $\lambda_1 = 0.6328\mu\text{m}$ , 20 franjas.

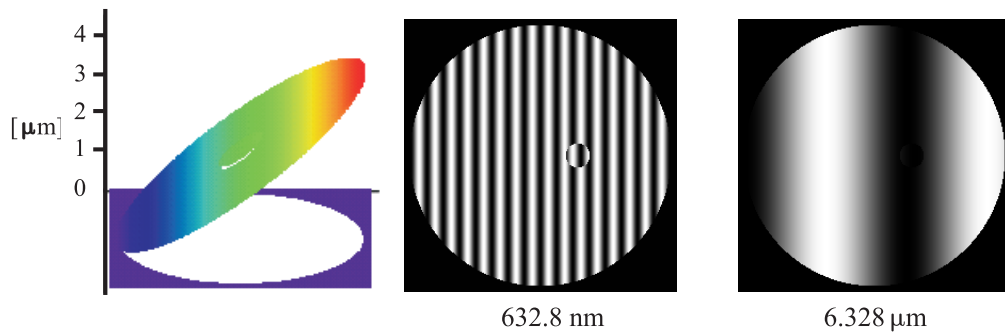


Figura 2.3: Ejemplo de evaluación de superficie con un salto en su centro de  $\lambda/4$ .

En la Fig. 2.3 se presenta un ejemplo en donde el centro de la superficie presenta un salto de  $\lambda_1/4$  con  $\lambda_1 = 632.8 \text{ nm}$ . Como se puede observar, en el interferograma obtenido con esta misma longitud de onda, resulta imposible determinar el orden de las franjas en la región

que contiene a esta discontinuidad. Mientras que al evaluar con una longitud de onda diez veces mayor que  $\lambda_1$ , esto es, con una longitud de onda  $\lambda_2 = 6328\mu\text{m}$ , la discontinuidad que se presentaba desaparece por lo que el problema de determinar el orden de las franjas no se presenta.

Debido a la problemática que implica utilizar láseres de  $\text{CO}_2$  para generar longitudes de onda más grandes que las del visible, algunos autores [24, 27, 30, 32], basándose en los trabajos de Hildebrand [16], comenzaron a utilizar la combinación de dos longitudes de onda del visible en la evaluación de sistemas ópticos para generar resultados como si una única longitud de onda, mayor que las dos utilizadas, se hubiese empleado.

Al evaluar algún sistema óptico con dos longitudes de onda del visible distintas  $\lambda_1$  y  $\lambda_2$  siendo  $\lambda_1 < \lambda_2$ , para cada una se tendrá una fase determinada por

$$\varphi_i = k_i(DCO), \quad (2.3)$$

en donde el subíndice  $i = 1, 2$  representa la correspondencia a  $\lambda_i$ ,  $k_i = 2\pi/\lambda_i$  y DCO es la *Diferencia de Camino Óptico* del sistema [15]. Entonces, la fase resultante al evaluar con ambas longitudes de onda es [10, 15]

$$\begin{aligned} \varphi_{eq} &= \varphi_2 - \varphi_1 = k_1(DCO) - k_2(DCO) = \\ &= 2\pi DCO \left( \frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right) = 2\pi DCO \left( \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{\lambda_2 \lambda_1} \right), \end{aligned} \quad (2.4)$$

de donde, la longitud de onda equivalente se define como

$$\lambda_{eq} = \frac{\lambda_2 \lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1}. \quad (2.5)$$

En la Fig. 2.4 se presenta el comportamiento de la Ec. (2.5) para algunos valores de  $\lambda_1$  y  $\lambda_2$ ; en la práctica, los valores para estas longitudes de onda están asociados con las longitudes de onda disponibles con las que se cuenta en el laboratorio. En esta gráfica es más conveniente observar el comportamiento de  $\lambda_{eq}$  con  $|\lambda_2 - \lambda_1|$  ya que las longitudes de onda con valores negativos no tienen un significado físico. Para observar este comportamiento, en este ejemplo se propuso un conjunto de pares  $(a, b)$  para calcular distintos valores de  $\lambda_{eq}$ . El elemento  $a$  corresponde a un valor fijo de  $\lambda_1 = 500$  nm. Mientras que el elemento  $b$  corresponde a  $\lambda_2$  y varía dentro del intervalo [351, 651] nm en pasos de 2 nm. De esta manera se evita tener  $\lambda_1 = \lambda_2$ , que es una discontinuidad en la gráfica, pero que prácticamente carece de sentido

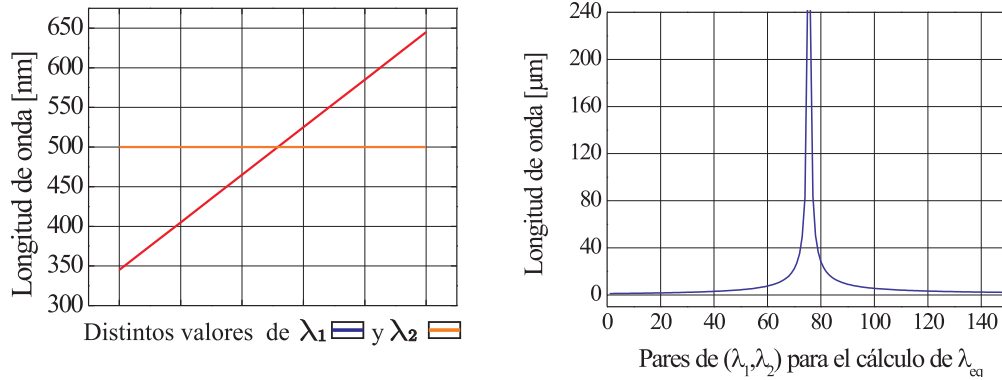


Figura 2.4: Comportamiento de  $\lambda_{eq}$ .

para la generación de patrones con longitud de onda equivalente ya que la fase para ambas mediciones sería la misma,  $\varphi_2 = \varphi_1$ , y no se tendría un patrón equivalente, i.e.,  $\varphi_{eq} = 0$ .

En la Fig. 2.4 (a) se presenta el conjunto de pares propuesto y en la Fig. 2.4 (b) se presenta el cálculo de la Ec. (2.5) pero evaluando el valor absoluto del denominador. En esta gráfica, el eje horizontal corresponde al conjunto de pares que se propuso previamente. Las gráficas de la Fig. 2.4, con valores experimentales de  $\lambda_1$  y  $\lambda_2$ , pueden ser utilizadas como una ayuda en el proceso de selección de dos longitudes de onda del visible cuando alguna longitud de onda del infrarrojo (IR) sea requerida. De modo que, dada cierta longitud del IR, se tenga una idea de los valores del visible que pueden ser empleados para la evaluación.

Finalmente, en la Fig. 2.5 (a), se muestra una representación típica de la generación de patrones con longitud de onda equivalente mediante la combinación de dos patrones de franjas registrados con longitudes de onda del visible [10]. Sin embargo, algunos autores [3, 14, 17], han encontrado que cuando  $\varphi_1$  y  $\varphi_2$  de la Ec. (2.4) se determinan por separado, la longitud de onda equivalente no está determinada por la Ec. (2.5) sino que ésta se puede incrementar por el *mínimo común múltiplo (mcm)* de  $\lambda_1$  y  $\lambda_2$  sin introducir ambigüedades de fase de  $2\pi$  dentro del intervalo generado de acuerdo a esta manera. Aunque en este trabajo no se utiliza este procedimiento, se considera importante aclarar esta diferencia. Para comprender esto mejor, en la Fig. 2.5 (b) se presenta el cambio de fase como función de la distancia para el patrón generado en (a) en donde las flechas indican la longitud para las cuatro diferentes longitudes de onda que se muestran. Como se observa en esta figura y como

se menciona en [3], la longitud de onda equivalente determinada por la Ec. (2.5) corresponde a la *distancia mínima* que tiene que cambiar la diferencia de camino óptico hasta que las fases de  $\varphi_1$  y  $\varphi_2$  sean iguales otra vez. En cambio, si  $\varphi_1$  y  $\varphi_2$  se miden separadamente, la longitud de onda equivalente se considera como aquella longitud para la cual  $\varphi_1 = \varphi_2 = 2\pi$ .

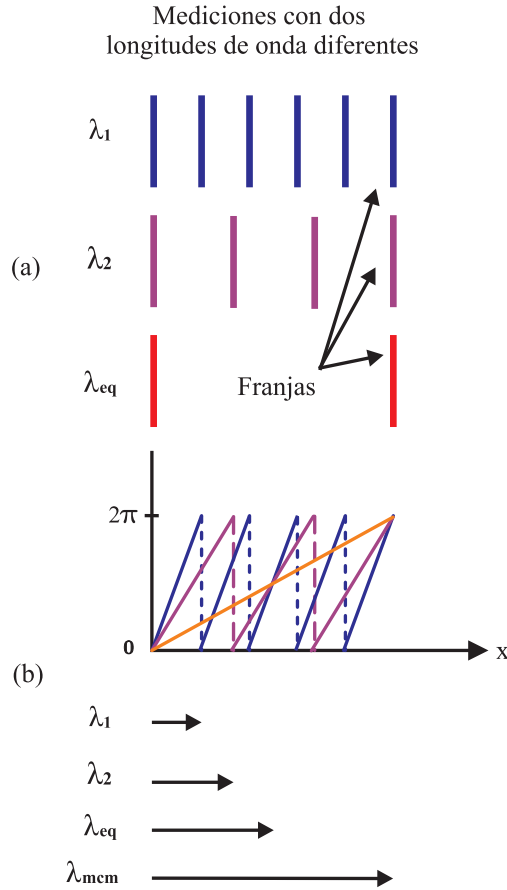


Figura 2.5: Representación esquemática de la generación de patrones con longitud de onda equivalente.

En el Cuadro 2.1 se presenta parte de una tabla de posibles combinaciones para algunas longitudes de onda de un láser Argón y un láser He-Ne presentada en [3]. En ella se enlistan tres valores en orden descendente. El primero es la longitud de onda equivalente calculado mediante la Ec. (2.5), el segundo valor corresponde al *mcm* entre ambas longitudes de onda y el tercer valor corresponde a la razón  $mcm/\lambda_{eq}$  para observar el incremento de  $\lambda_{eq}$  si se



utiliza el mínimo común múltiplo para determinar el patrón equivalente.

En este trabajo, la obtención de Ronchigramas con longitud de onda equivalente está de acuerdo con la Ec. (2.5) ya que como se describe más adelante, el procedimiento utilizado para generar un Ronchigrama con longitud de onda equivalente se realiza mediante la combinación o patrón de Moiré entre dos Ronchigramas con longitudes de onda del visible y no mediante el cálculo de la fase individual de cada Ronchigrama.

$\lambda(\mu\text{m})$	0.4579	0.4765	0.4880	0.4965	0.5017	0.5145	0.6328
0.4579		11.73	7.42	5.89	5.24	4.16	1.66
	–	2181.89	2234.55	2273.47	2297.28	2355.90	2897.59
		<b>186</b>	<b>301</b>	<b>386</b>	<b>438</b>	<b>566</b>	<b>1749</b>
0.4765	11.73		20.22	11.83	5.24	4.16	1.66
	2181.89	–	2234.55	2273.47	2297.28	2355.90	2897.59
	<b>186</b>		<b>23</b>	<b>40</b>	<b>252</b>	<b>76</b>	<b>1563</b>
0.4880	7.42	20.22		28.50	17.87	9.47	2.13
	2234.55	465.06	–	484.58	2448.30	502.15	386.01
	<b>301</b>	<b>23</b>		<b>17</b>	<b>137</b>	<b>53</b>	<b>181</b>
0.4965	5.89	11.83	28.50		47.90	14.19	2.31
	2273.47	473.16	484.58	–	2490.94	170.30	3141.85
	<b>386</b>	<b>40</b>	<b>17</b>		<b>52</b>	<b>12</b>	<b>1363</b>

Cuadro 2.1: En esta tabla se presentan algunas longitudes de onda de un láser de Argón y un láser He-Ne para generar la longitud de onda equivalente. Para cada par de longitudes de onda se presentan tres valores. El primero corresponde al valor de la longitud de onda equivalente calculado de acuerdo a la Ec. (2.5). El segundo valor corresponde al *mcm* entre ambas longitudes. El tercer valor corresponde a la razón  $mcm/\lambda_{eq}$  para observar el incremento que se obtiene al generar el patrón mediante el *mcm*.

## 2.2. Patrones de Moiré

El término *moiré* comúnmente se designa para denotar al patrón producido cuando se superponen dos rejillas de la misma frecuencia. En general, los métodos que utilizan esta

técnica como lo es la proyección de franjas son muy robustos ante perturbaciones externas. De manera general, existen tres casos típicos de generación de patrones de Moiré [10, 23]. El primero se presenta cuando se superponen dos rejillas de la misma frecuencia con cierto ángulo de inclinación entre ellas; la segunda, cuando se superponen rejillas de diferente frecuencia sin inclinación entre ellas; y la tercera, cuando se superponen dos rejillas de distinta frecuencia con un ángulo de inclinación entre ellas. Estos tres casos pueden ser observados en la Fig. 2.6.

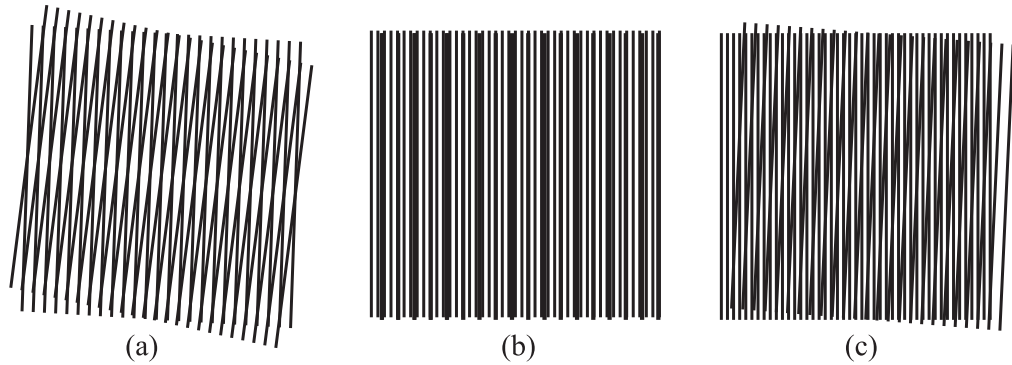


Figura 2.6: Generación de patrones de Moiré con: (a), rejillas de la misma frecuencia con inclinación; (b), rejillas de diferente frecuencia sin inclinación; (c), rejillas de diferente frecuencia con inclinación entre ellas.

El análisis matemático de los patrones de moiré considera dos rejillas arbitrarias denotadas por las funciones de transmisión de intensidad  $f_1(x, y)$  y  $f_2(x, y)$  descritas por las siguientes series de Fourier [10, 23]

$$f_1(x, y) = a_1 + \sum_{n=1}^{\infty} b_{1_n} \cos[n\phi_1(x, y)], \quad (2.6)$$

$$f_2(x, y) = a_2 + \sum_{m=1}^{\infty} b_{2_m} \cos[m\phi_2(x, y)],$$

en donde,  $\phi(x, y)$  es la función que describe la forma básica de las rejillas y los coeficientes  $b$  determinan el perfil de las líneas que componen la rejilla. La superposición de ambas rejillas, o en otras palabras, el moiré o patrón generado por ambas rejillas está definido por

la siguiente función de transmisión de intensidad [10]

$$f_1(x, y)f_2(x, y) = a_1a_1 + a_1 \sum_{m=1}^{\infty} b_{2m} \cos[m\phi_2(x, y)] + a_2 \sum_{n=1}^{\infty} b_{1n} \cos[n\phi_1(x, y)] + \quad (2.7)$$

$$+ \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} b_{1n} b_{2m} \cos[n\phi_2(x, y)] \cos[m\phi_2(x, y)],$$

en donde, el último término de ésta última ecuación puede ser reescrito como

$$= \frac{1}{2} b_{11} b_{21} \cos[\phi_1(x, y) - \phi_2(x, y)] + \quad (2.8)$$

$$+ \frac{1}{2} \sum_{m=2}^{\infty} \sum_{n=2}^{\infty} b_{1n} b_{2m} \cos[n\phi_1(x, y) - m\phi_2(x, y)] +$$

$$+ \frac{1}{2} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} b_{1n} b_{2m} \cos[n\phi_1(x, y) + m\phi_2(x, y)].$$

Como se puede observar en esta última expresión, la suma y resta de las fases también modulará el patrón final. Como se verá en la siguiente sección, serán precisamente estas cantidades las que dan lugar a la longitud de onda equivalente o efectiva.

### 2.3. Ronchigramas con longitud de onda equivalente

Como se ha mencionado en el Cap. 1, en este trabajo se muestra la evaluación realizada de una superficie óptica con la Prueba de Ronchi y el concepto de longitud de onda equivalente. Para ello, se deben registrar dos ronchigramas con longitudes de onda del visible manteniendo las mismas características tanto del sistema óptico como las de la rejilla de Ronchi, con periodos bajos, en el registro de cada Ronchigrama. De modo que, para generar un Ronchigrama con longitud de onda equivalente se procede a obtener computacionalmente un patrón de moiré con ambos Ronchigramas registrados. Entonces, dadas dos longitudes de onda del visible,  $\lambda_1$  y  $\lambda_2$ , su Ronchigrama correspondiente (como se mencionó en la Sec. 1.4.3) se puede representar de la siguiente manera

$$I_1(x, y) = I_{0_1} + \beta_1 \cos \left[ \frac{2\pi}{\lambda_{q_1}} \alpha(x, y) \right],$$

$$I_2(x, y) = I_{0_2} + \beta_2 \cos \left[ \frac{2\pi}{\lambda_{q_2}} \alpha(x, y) \right], \quad (2.9)$$

en donde,  $I_1(x, y)$  e  $I_2(x, y)$  son los patrones de intensidad o imágenes registradas para cada Ronchigrama. Mientras que  $\lambda_{q_1}$  y  $\lambda_{q_2}$  están definidas por

$$\lambda_{q_1} = \frac{d(\lambda_1)D}{2r}; \lambda_{q_2} = \frac{d(\lambda_2)D}{2r}, \quad (2.10)$$

en donde el periodo de las franjas de cada Ronchigrama es distinto para cada longitud de onda. Entonces, el patrón de moiré generado correspondiente al caso típico de combinación de rejillas de distinta frecuencia.

En adelante, trataremos a cada Ronchigrama desde el punto de vista del procesamiento de imágenes, en donde  $I_1(x, y)$  e  $I_2(x, y)$  son imágenes con niveles de gris en el rango dinámico  $[0,255]$ ;  $I_{0_1}$  e  $I_{0_2}$  corresponden al nivel de gris de fondo de cada Ronchigrama y los términos cosenoidales representan la información de cada imagen. De modo que la cantidad  $I_{0_1}I_{0_2}$ , al ser reescalada al rango dinámico  $[0,255]$  (debido al hecho de que el producto cae fuera del rango) representa un nuevo nivel de gris de fondo.

Para generar el Ronchigrama con longitud de onda equivalente utilizando las imágenes dadas por la Ec. (2.9), se procede a combinarlas mediante la Ec. (2.7) de la siguiente manera

$$I_1(x, y)I_2(x, y) = \left\{ I_{0_1} + \beta_1 \cos \left[ \frac{2\pi}{\lambda_{q_1}} \alpha(x, y) \right] \right\} \left\{ I_{0_2} + \beta_2 \cos \left[ \frac{2\pi}{\lambda_{q_2}} \alpha(x, y) \right] \right\}, \quad (2.11)$$

que al desarrollarla se puede escribir como

$$\begin{aligned} I_1(x, y)I_2(x, y) = & \\ & I_{0_1}I_{0_2} \\ & + I_{0_1}\beta_2 \cos \left[ \frac{2\pi}{\lambda_{q_2}} \alpha(x, y) \right] \\ & + I_{0_2}\beta_1 \cos \left[ \frac{2\pi}{\lambda_{q_1}} \alpha(x, y) \right] \\ & + \beta_1\beta_2 \cos \left[ \frac{2\pi}{\lambda_{q_1}} \alpha(x, y) \right] \cos \left[ \frac{2\pi}{\lambda_{q_2}} \alpha(x, y) \right], \end{aligned} \quad (2.12)$$

en donde, el primer término será un nivel de gris constante en la imagen resultante, el segundo término tiene información del segundo Ronchigrama así como el tercer término tiene información del primero. Como se sabe de la Sec. 2.2, es el último término el que tiene información de la longitud de onda equivalente. En este caso, al desarrollarlo se tiene

$$\frac{1}{2}\beta_1\beta_2 \cos \left[ 2\pi\alpha(x, y) \left( \frac{\lambda_{q_2} + \lambda_{q_1}}{\lambda_{q_1}\lambda_{q_2}} \right) \right] + \frac{1}{2}\beta_1\beta_2 \cos \left[ 2\pi\alpha(x, y) \left( \frac{\lambda_{q_2} - \lambda_{q_1}}{\lambda_{q_1}\lambda_{q_2}} \right) \right], \quad (2.13)$$

en donde, el primer término de la Ec. (2.13) tiene una frecuencia mayor que las frecuencias de cada Ronchigrama experimental. Por ejemplo, si  $\lambda_{q_1} \simeq \lambda_{q_2} = \lambda_q$ , la cantidad  $\frac{\lambda_{q_1}\lambda_{q_2}}{\lambda_{q_1}+\lambda_{q_2}}$  es aproximadamente

$$\frac{\lambda_q^2}{2\lambda_q} \simeq \frac{\lambda_q}{2}, \quad (2.14)$$

La cual representaría el doble de las frecuencias de los Ronchigramas experimentales. Obviamente, esta frecuencia no es útil en el problema que se intenta resolver pues estamos buscando reducir el número de franjas lo que implica tener longitudes de onda más grandes que las utilizadas en el experimento. En el segundo término, se tiene una modulación dada por  $\frac{\lambda_{q_1}-\lambda_{q_2}}{\lambda_{q_1}\lambda_{q_2}}$ , cuya forma se definió en la Sec. 2.1 como la longitud de onda equivalente.

Para el patrón generado de esta manera, la longitud de onda equivalente queda determinada por

$$\lambda_{qR} = \frac{\lambda_{q_1}\lambda_{q_2}}{\lambda_{q_2} - \lambda_{q_1}}, \quad (2.15)$$

en donde, el subíndice R se ha utilizado para denotar la definición que toma  $\lambda_q$  en la prueba de Ronchi. Cuando sustituimos la Ec. (2.10) en esta última ecuación se tiene

$$\lambda_{qR} = \frac{\lambda_{q_1}\lambda_{q_2}}{\lambda_{q_2} - \lambda_{q_1}} = \frac{d_2 d_1}{d_2 - d_1} \frac{D}{2r}, \quad (2.16)$$

en donde,  $d_1$  es  $d(\lambda_1)$  y  $d_2$  es  $d(\lambda_2)$  de la Ec. (2.10). Al utilizar la definición para  $d$  dada por la Ec. (1.15),  $\lambda_{eqR}$  queda finalmente definida como

$$\lambda_{qR} = \frac{\lambda_2 \lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \frac{Dl}{2rp}. \quad (2.17)$$

Esta expresión representa el factor de escala, Ec. (1.16), para el Ronchigrama con longitud de onda equivalente, i.e.,

$$\lambda_{qR} = \frac{\lambda_2 \lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \frac{Dl}{2rp} = \frac{d(\lambda_{eq})D}{2r} = \frac{\lambda_{eqR} l}{p} \frac{D}{2r}, \quad (2.18)$$

de donde, la longitud de onda equivalente para el Ronchigrama generado es

$$\lambda_{eqR} = \frac{\lambda_2 \lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1}, \quad (2.19)$$

que coincide con la definición presentada en la Ec. (2.5).

Además de la información con longitud de onda equivalente, el Ronchigrama descrito por la Ec. (2.12), contiene otras frecuencias mayores que deben ser eliminadas para observar

únicamente el patrón correspondiente a la longitud de onda equivalente. Para ello, debe utilizarse un filtro pasabajas con frecuencia de corte,  $D_0$ , de la siguiente manera

$$D_0 < \text{mín} \left\{ f_1 = \frac{1}{\lambda_{q_1}}, f_2 = \frac{1}{\lambda_{q_2}}, f_3 = \frac{1}{\lambda_{q_+}} \right\}, \quad (2.20)$$

en donde, del primer término de la Ec. (2.13),  $f_3$  denota la frecuencia generada por la longitud de onda

$$\lambda_{q_+} = \frac{\lambda_{q_1} \lambda_{q_2}}{\lambda_{q_1} + \lambda_{q_2}}, \quad (2.21)$$

de modo que después de realizar el filtraje frecuencial se tenga la imagen dada por

$$I_f(x, y) = I_{0_1} I_{0_2} + \frac{1}{2} \gamma_1 \gamma_2 \cos \left[ \frac{2\pi}{\lambda_{q_R}} \alpha(x, y) \right], \quad (2.22)$$

el cual corresponde al Ronchigrama con longitud de onda equivalente  $\lambda_{eqR}$  que se desea. Para el análisis de este patrón debe considerarse la Ec. (1.15) que involucra el periodo entre sus franjas y la distancia a la que fueron capturados los Ronchigramas en la generación de este patrón.

En el siguiente capítulo se describe a detalle las técnicas de Procesamiento Digital de Imágenes y los procedimientos computacionales que se requieren para generar Ronchigramas con longitud de onda equivalente. Se verá que las etapas de pre-procesamiento juegan un papel importante en la visibilidad de las franjas de los resultados finales.

# Capítulo 3

## Procesamiento Digital de Ronchigramas

En este capítulo se presentan los principales procedimientos del procesamiento digital de imágenes utilizados para obtener Ronchigramas con longitud de onda equivalente. De manera general, se discuten tres etapas de procesamiento debido a las siguientes razones:

- Problemas relacionados con ruido impulsivo [13] en los Ronchigramas capturados, asociados principalmente a la intensidad de la iluminación que entra en el CCD.
- El manejo de la visibilidad de las franjas de Ronchi mediante el mejoramiento [13] de los Ronchigramas por combinar.
- Un filtro pasa bajas mediante el cual se logran obtener los Ronchigramas con la longitud de onda equivalente.

### 3.1. Eliminación de Ruido en Ronchigramas

La aparición de ruido *impulsivo* o ruido *sal y pimienta* [13] es un problema común que se presenta con las cámaras CCD cuando por alguna razón se tiene baja intensidad en la iluminación que registra el detector. En los procesos de evaluación de superficies ópticas, este tipo de ruido se puede presentar, por ejemplo, cuando se prueban superficies ópticas lentas ya que en estos casos la distancia entre la cámara CCD y la superficie que se está probando se incrementa. Otro ejemplo es cuando se utiliza algún elemento óptico como un filtro o un

atenuador enfrente de la cámara lo cual tiene el mismo efecto de disminuir la intensidad de la iluminación generando nuevamente ruido impulsivo.

Aún cuando no siempre aparezca el tipo de ruido antes mencionado cuando se registra una imagen con algún CCD siempre existe la posibilidad de que éste problema se presente. Por esta razón se ha considerado útil presentar algunas soluciones mediante procesamiento de imágenes a este problema.

### 3.1.1. Promediado de imágenes

En la Fig. 3.1 se presenta un ejemplo de un Ronchigrama registrado en el laboratorio en el cual se muestra la aparición de ruido del tipo sal y pimienta. Una manera de eliminar este tipo de ruido consiste en promediar varias imágenes del mismo Ronchigrama de modo que la ponderación reduzca considerablemente el ruido. Para ello, una consideración importante es que el ruido no se encuentre correlacionado de un pixel a otro y que su valor promedio es cero [13].

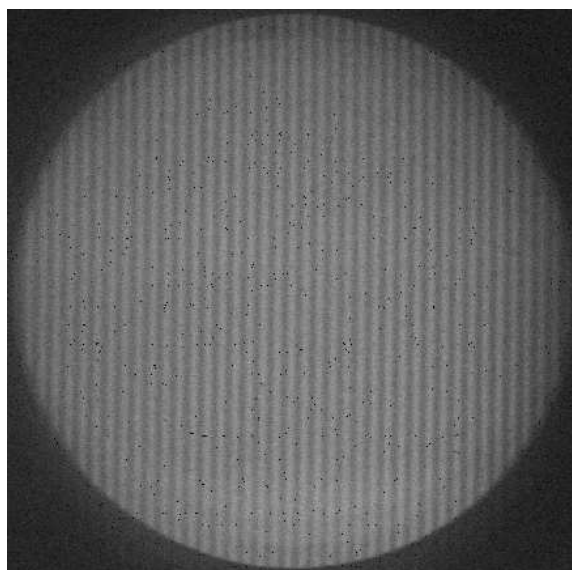


Figura 3.1: Aparición de ruido tipo sal y pimienta en algunos Ronchigramas debido a baja intensidad en la iluminación.

Sea una imagen con ruido  $g(x, y)$  formada por la adición de ruido  $\eta(x, y)$  a una imagen



original  $f(x, y)$ , dada por [13]

$$g(x, y) = f(x, y) + \eta(x, y), \quad (3.1)$$

el promedio de un conjunto,  $g_i(x, y)$ , de imágenes con ruido es

$$\bar{g}(x, y) = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K g_i(x, y). \quad (3.2)$$

Debido a que el ruido en el conjunto de imágenes  $g(x, y)$  no está correlacionado de un pixel a otro, el valor esperado<sup>1</sup> de la imagen promediada es la imagen  $f(x, y)$ , esto es

$$\begin{aligned} E\{\bar{g}(x, y)\} &= f(x, y), \\ \sigma_{\bar{g}(x, y)}^2 &= \frac{1}{K} \sigma_{\eta(x, y)}^2, \end{aligned} \quad (3.3)$$

en donde,  $E\{\bar{g}(x, y)\}$  es el valor esperado de  $\bar{g}$ ,  $\sigma_{\bar{g}}^2$  y  $\sigma_{\eta}^2$  son las varianzas de  $\bar{g}$  y  $\eta$ , respectivamente. La desviación estandar en cualquier punto en la imagen promediada es

$$\sigma_{\bar{g}(x, y)} = \frac{1}{\sqrt{K}} \sigma_{\eta(x, y)}. \quad (3.4)$$

Como se observa en las Ecs. (3.2), (3.3) y (3.4), el incremento del número de imágenes  $K$  hace que la variabilidad descrita por  $\sigma_{\bar{g}}^2$ , asociada al ruido en la imagen final, disminuya considerablemente conforme el número  $K$  aumenta. En otras palabras, el ruido disminuye conforme se promedien cada vez más imágenes.

### 3.1.2. Filtro de mediana

El filtro de mediana, como su nombre lo indica, reemplaza el valor de un pixel por la mediana de los niveles de gris que se encuentran alrededor o en la vecindad de ese pixel. Este filtro resulta especialmente útil en la eliminación de ruido impulsivo [28]. Básicamente, la respuesta de este filtro se basa en la ordenación de los pixeles contenidos en una cierta vecindad de la imagen para después sustituir el valor del pixel central por el valor determinado por el ordenamiento. Recordemos que la mediana,  $\xi$ , de un conjunto de valores es tal que la

---

<sup>1</sup>Recuerdese que la covarianza de dos variables aleatorias  $x_i$  y  $x_j$  se define como  $E[(x_i - m_i)(x_j - m_j)]$ , en donde  $m_i$  y  $m_j$  son sus valores medios, respectivamente. Si las variables no están correlacionadas, su covarianza es cero.

mitad de los valores en el conjunto son menores o iguales que  $\xi$ , y la mitad son mayores o iguales que  $\xi$ .

Básicamente, la función del filtro de mediana es forzar aquellos puntos con niveles de gris distintos a parecerse más a sus píxeles vecinos dentro de la vecindad escogida. En la Fig. 3.2 se presenta la imagen de la Fig. 3.1 filtrada con este filtro; como se puede observar, este filtro es muy útil para la eliminación de ruido en los Ronchigramas.

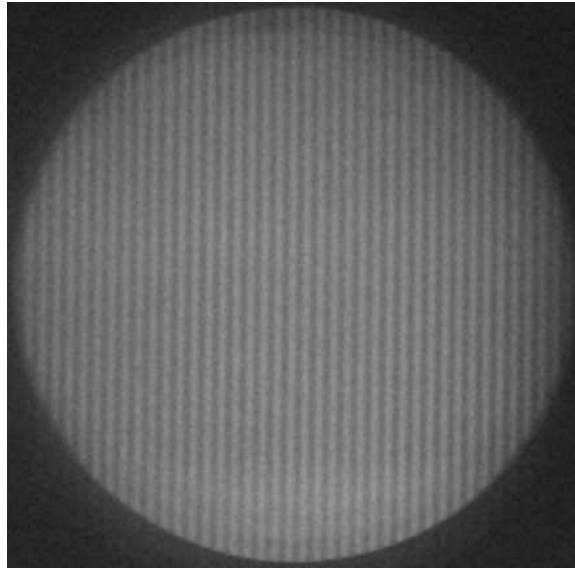


Figura 3.2: Eliminación de ruido tipo sal y pimienta utilizando filtros estadísticos.

## 3.2. Mejoramiento de Ronchigramas

### 3.2.1. Corrección-gamma

La parte del mejoramiento de imágenes se basa en el cambio de los tonos de gris de la imagen a través de un mapeo o por medio de una función de transformación, con lo cual se mejora la apariencia visual de la imagen [13, 25]. La *corrección gamma* es una de las técnicas más utilizadas y en esta se generan nuevos niveles de gris elevando los niveles de gris de la imagen original a cierta potencia determinada. Entonces, los nuevos niveles de gris  $g'$  se generan a partir de la transformación

$$g' = T(g) = cg^\gamma, \quad (3.5)$$

donde  $c$  es una constante de escalamiento y  $\gamma$  es la potencia a la cual se elevan los niveles de gris, estas dos constantes son valores positivos.

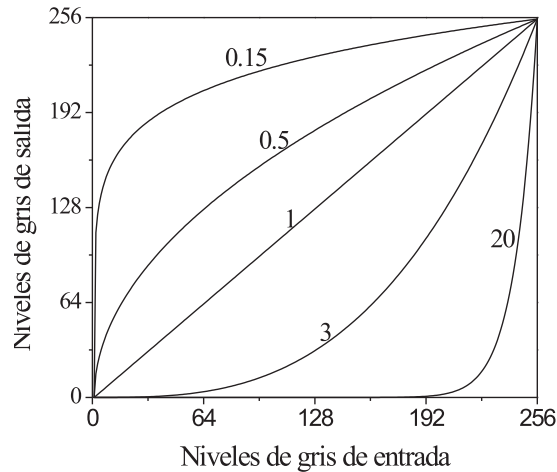


Figura 3.3: gráficas de la corrección-gamma con  $c = 1$  y  $\gamma = 0.15, 0.5, 1, 3, 20$ . Se muestra el valor de gamma utilizado sobre cada curva.

En la Fig. 3.3 se muestran algunas curvas de  $T(g)$  para algunos valores de  $\gamma$ . Como se puede notar de esta figura para los valores de gamma menores que la unidad, el mapeo transformará la imagen original en una imagen más clara ya que un intervalo amplio de niveles de gris oscuros se mapean como niveles de gris más claros. El caso contrario ocurre para valores de gamma mayores que la unidad, lo que resultará en imágenes más oscuras que la imagen original ya que para estos valores, muchos de los niveles de gris más claros son mapeados a niveles de gris más oscuros.

En la Fig. 3.4, se presenta la aplicación de esta técnica a un Ronchigrama. Específicamente, se presenta el perfil de la línea central de un Ronchigrama en donde se puede observar con mayor detalle el resultado de la aplicación de este mejoramiento para distintos valores de  $\gamma$ . Para  $\gamma = 1$ , el perfil que se presenta corresponde al Ronchigrama sin modificación, el cual se encuentra sobre la distribución de intensidad de la fuente de iluminación utilizada en el registro de este Ronchigrama (en este ejemplo, la fuente de iluminación con el que se registro este Ronchigrama es un LED ultraluminiscente que se describe en la Sección 4.1).

Aunque de manera global la visibilidad<sup>2</sup> del Ronchigrama para  $\gamma = 1$ , Fig. 3.4 (a), es mayor que para valores de gamma menores que la unidad, se puede observar que debido a esta distribución, localmente existe cierta variabilidad en la visibilidad entre las franjas del centro y aquellas que se encuentran en los extremos del Ronchigrama. Como se verá enseguida, esta distribución afecta la comparación de Ronchigramas para obtener resultados con longitud de onda equivalente [12].

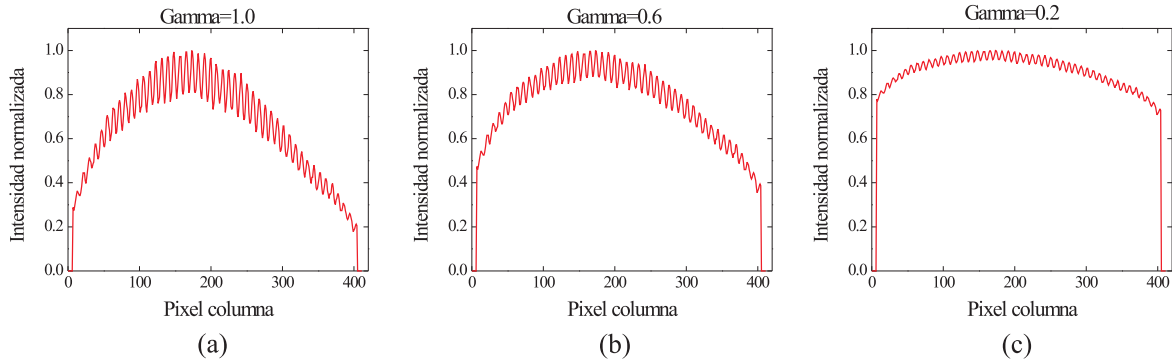


Figura 3.4: Perfil de la línea central de un Ronchigrama para distintos valores de  $\gamma$ .

Para valores de  $\gamma = 0.6$  y  $\gamma = 0.2$ , Fig. 3.4 (b) y (c), respectivamente, se observa que la distribución de la intensidad a lo largo del Ronchigrama se comporta más homogéneamente conforme la aplicación de  $\gamma$  disminuye. Aunado a esto, se observa, Fig. 3.4 (c), que la visibilidad del Ronchigrama es más homogénea a lo largo de éste después de la aplicación de la técnica. Aunque la visibilidad de las franjas disminuye con la aplicación de la corrección gamma, la visibilidad de este Ronchigrama, Fig. 3.4 (c), puede ser aumentada eliminando el fondo de la imagen y escalando la variación en ella, lo cual resulta menos efectivo para el Ronchigrama original, Fig. 3.4 (a). Esta redistribución de la intensidad en los Ronchigramas debida a la corrección gamma tiene el efecto como si el Ronchigrama se hubiera registrado con una fuente más coherente.

En este trabajo, los Ronchigramas registrados con  $\lambda_1$  y  $\lambda_2$ ,  $R_1$  y  $R_2$ , respectivamente, tienen la misma distribución de intensidad ya que se registran con la misma fuente de iluminación pero utilizando filtros de color, ver Sec. 4.1. Sin embargo, en la generación de

<sup>2</sup>Recuerdese que la visibilidad puede entenderse como la razón entre la información de la señal y la señal de fondo.

Ronchigramas con longitud de onda equivalente, en ocasiones resulta, que una comparación directa entre  $R_1$  y  $R_2$  genera franjas con una baja visibilidad y en otras ocasiones no es posible distinguirlas. Entonces, una manera de resolver esta problemática se encuentra mediante la aplicación de la corrección gamma a  $R_1$  y  $R_2$  antes de ser combinados. Esto permite realizar una mejor comparación entre imágenes para generar Ronchigramas con longitud de onda equivalente. De hecho, con la aplicación de la corrección gamma se consigue aumentar la coherencia entre  $R_1$  y  $R_2$ , lo cual es un factor necesario para la generación de Ronchigramas con longitud de onda equivalente. Además, como se verá en los siguientes ejemplos, el aumento en la señal de fondo de  $R_1$  y  $R_2$  debida a la aplicación de la corrección gamma, ayuda a mejorar la visibilidad de las franjas en el Ronchigrama con longitud de onda equivalente, pues al realizar el patrón de Moire entre  $R_1$  y  $R_2$  aparece la diferencia entre estos Ronchigramas, de modo que la señal de fondo en el patrón resultante es casi cero mejorando considerablemente la visibilidad en los resultados finales.

A manera de resumen, se pueden mencionar las siguientes ventajas del empleo de la corrección gamma en la generación de Ronchigramas con longitud de onda equivalente:

- Se hace más homogénea la visibilidad de las franjas a lo largo de un Ronchigrama. Esto no significa que la aplicación de la corrección gamma aumente la visibilidad de las franjas. Significa que la variación de las franjas se vuelve más similar entre franjas después del mejoramiento.
- Aumenta la coherencia entre  $R_1$  y  $R_2$ , lo cual es un factor importante para generar resultados con longitud de onda equivalente [12].
- Incrementa la señal de fondo de  $R_1$  y  $R_2$ , lo que mejora la visibilidad en los resultados finales, ya que en el proceso de comparación entre  $R_1$  y  $R_2$  esta señal se elimina. Entonces, en el patrón resultante, aparece más la información de  $R_1$  y  $R_2$  y no de la señal de fondo.

En la Fig. 3.5, se presentan algunos perfiles de la comparación de dos Ronchigramas para generar un Ronchigrama con longitud de onda equivalente. En (a) y (b) se presentan dos Ronchigramas sin ningún mejoramiento,  $\gamma = 1$ , y en (c) se observa el perfil del Ronchigrama con longitud de onda equivalente obtenido para este valor de gamma. Como se puede observar, no es posible distinguir con claridad alguna franja en el resultado; dicho en otras

palabras, la visibilidad de las franjas es casi nula para este caso. En cambio con la aplicación de la corrección-gamma, para  $\gamma = 0.6$ , Ronchigramas (d) y (e), claramente se observan las franjas de un Ronchigrama con longitud de onda equivalente en el que se utilizaron rejillas sub-estructuradas, (f).

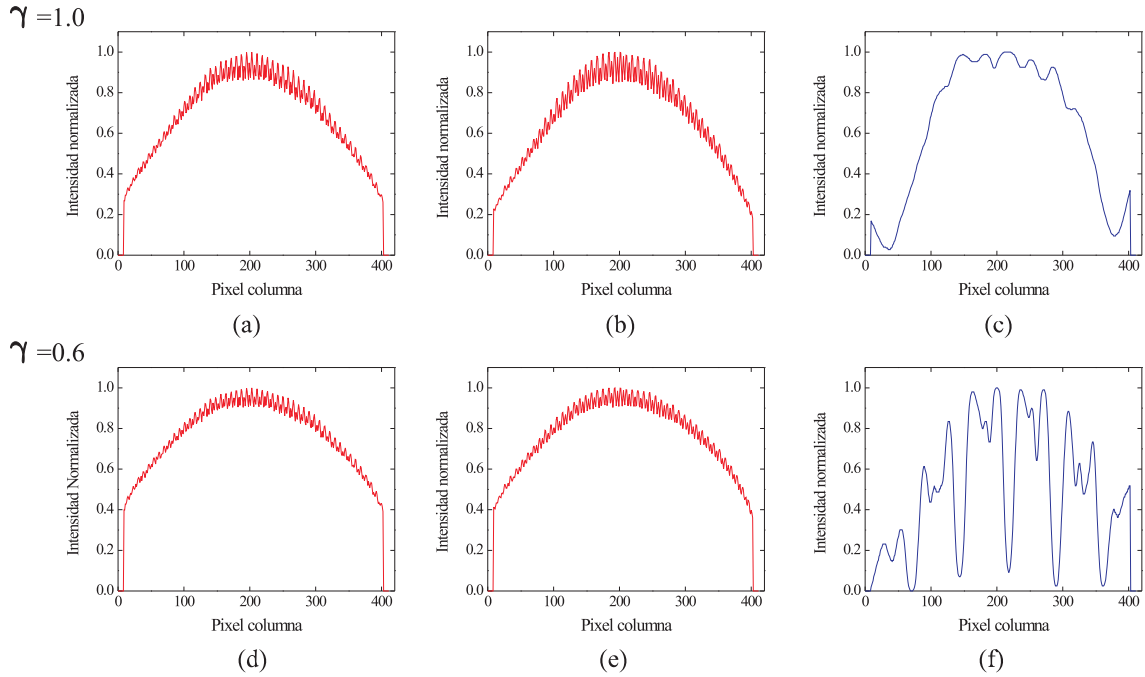


Figura 3.5: Incremento de la visibilidad en Ronchigramas con longitud de onda equivalente mediante la aplicación de la corrección-gamma. Ronchigramas (a) y (b), registrados con distintas longitudes de onda, sin aplicación de mejoramiento,  $\gamma = 1$ ; (c) Ronchigrama con longitud de onda equivalente generado con los Ronchigramas (a) y (b). Los Ronchigramas (d) y (e) son los resultados del mejoramiento con  $\gamma = 0.6$  a los Ronchigramas (a) y (b), respectivamente; (f), Ronchigrama con longitud de onda equivalente generado con los Ronchigramas (d) y (e).

En la Fig. 3.6, se observan los Ronchigramas correspondientes a los perfiles (c) y (f) presentados en la Fig. 3.5 después de la etapa de filtrado que se discutirá en la siguiente sección. Aunque en la imagen (a) se observa cierta información de las franjas del Ronchigrama, no es sino hasta que se aplica la corrección gamma cuando se hace notoria la información de las franjas del Ronchigrama. En este ejemplo, la selección del valor de  $\gamma$  se ha hecho de manera visual, i.e., mediante la observación del Ronchigrama final. En la Sec. 3.4, se presenta un algoritmo que puede servir para seleccionar el valor óptimo de  $\gamma$ . Es preciso

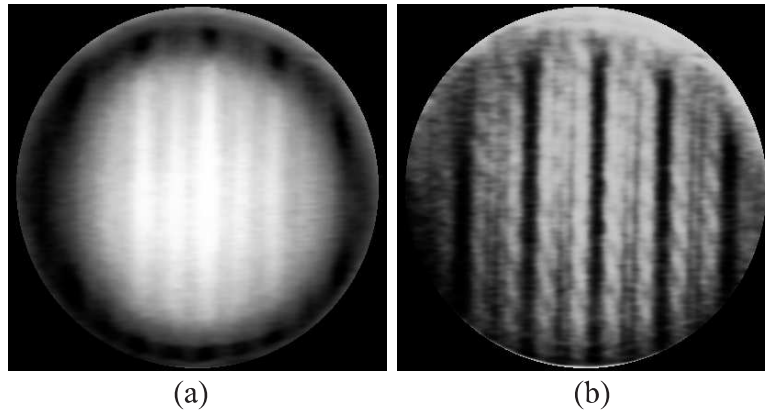


Figura 3.6: Ronchigramas con longitud de onda equivalente. (a), obtenido sin la aplicación de la corrección gamma. (b), Ronchigrama obtenido con  $\gamma = 0.6$ .

mencionar que al encontrar el valor de  $\gamma$  para el cual se observan con mayor visibilidad las franjas del resultado final, la selección de valores de  $\gamma$  menores no implica un aumento a la visibilidad del Ronchigrama final, siendo esta cantidad de  $\gamma$  encontrada, un valor umbral en el mejoramiento.

En esta propuesta experimental, el valor de gamma depende de ciertos parámetros que afectan la distribución de la intensidad de luz a lo largo del Ronchigrama. En el caso de probar alguna superficie con una misma fuente de luz, entonces dependerá únicamente de las longitudes de onda del visible involucradas, el tipo de rejilla utilizado y de la distancia entre ésta y la superficie bajo prueba.

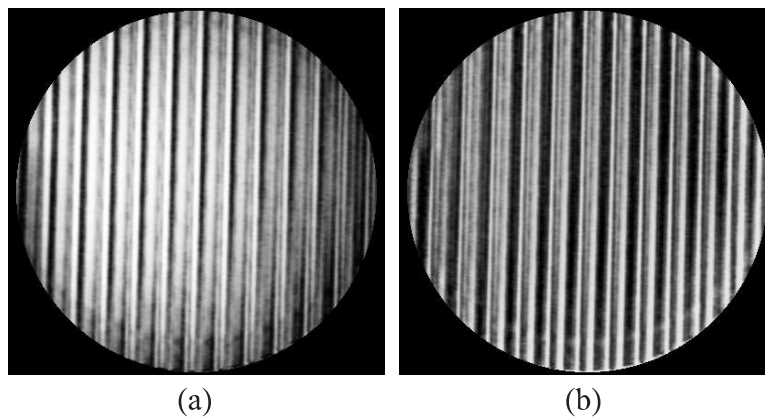


Figura 3.7: Ronchigramas con longitud de onda equivalente. (a), con  $\gamma = 0.8$  y (b),  $\gamma = 0.2$ .

Finalmente, se presenta otro ejemplo, Fig. 3.7, en donde se observa el mejoramiento de la apariencia visual de un Ronchigrama con longitud de onda equivalente y rejilla subestructurada aplicando primero  $\gamma = 0.8$  y después  $\gamma = 0.2$ . Claramente se observa como afecta este mejoramiento a la visibilidad en los resultados finales.

### 3.3. Filtraje Pasabajas

Como se mencionaba en la Sec. 2.3, la generación de Ronchigramas con longitud de onda equivalente contendrá frecuencias mayores a las generadas por esta longitud de onda, Ec. (2.20), las cuales deben filtrarse para observar únicamente las franjas de la longitud de onda equivalente. Para ello es necesario utilizar algún filtro pasabajas.

En este trabajo se utiliza un filtro Gaussiano pasabajas en el dominio de la frecuencia definido como [13],

$$H(u, v) = e^{-D^2(u,v)/2\sigma^2}, \quad (3.6)$$

en donde,  $\sigma$  es una medida de la extensión del filtro. Comúnmente esta cantidad es igualada con la frecuencia de corte<sup>3</sup>,  $D_0$ , de modo que el filtro queda dado por

$$H(u, v) = e^{-D^2(u,v)/2D_0^2}, \quad (3.7)$$

en donde, para un filtro de tamaño  $M \times N$ ,  $D(u, v)$  es la distancia de algún punto  $(u, v)$  a la posición del origen del filtro  $(M/2, N/2)$ , esto es,

$$D(u, v) = [(u - M/2)^2 + (v - N/2)^2]^{1/2}. \quad (3.8)$$

En la Fig. 3.8 se muestran los detalles principales de este filtro y su comportamiento para algunas frecuencias de corte.

Como se menciona anteriormente, la selección de la frecuencia de corte se realizará escogiendo un valor menor al de la Ec. (2.20). Sin embargo, la selección de  $D_0$  puede realizarse superponiendo la imagen del filtro pasabajas sobre la transformada de Fourier de la imagen por filtrar. Para ello, se debe tener en consideración el tamaño  $M \times N$  de la imagen que se está filtrando. De esta manera se puede estimar claramente la frecuencia de corte del filtro

---

<sup>3</sup>Recuerdese que para un filtro ideal, todas las frecuencias menores o iguales que  $D_0$  se dejarán pasar mientras que las frecuencias mayores a  $D_0$  serán bloqueadas o filtradas.



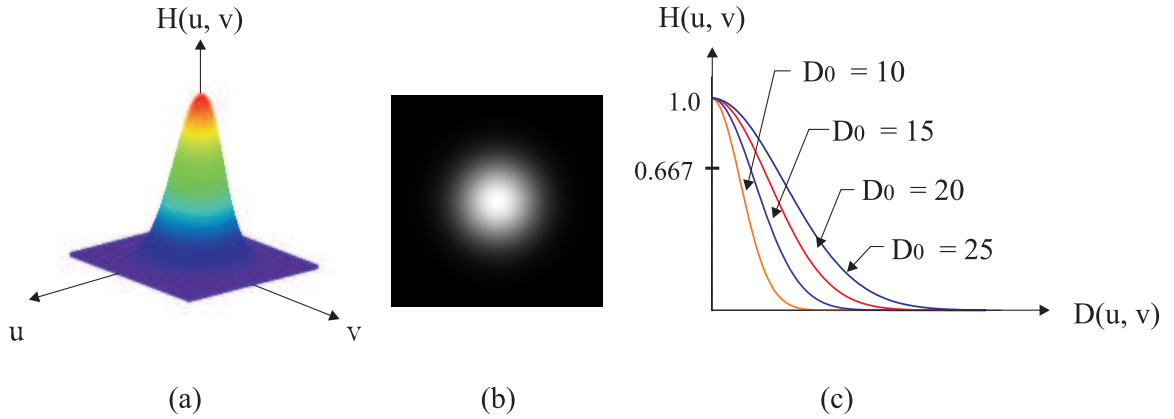


Figura 3.8: Características principales del Filtro Gaussiano pasabajas.

Gaussiano. Un ejemplo de esto se muestra en la Fig. 3.9, en donde en (a) se muestra el Ronchigrama con longitud de onda equivalente sin filtraje. En (b) se muestra su espectro de Fourier. En (c) se muestra el filtro pasabajas con  $D_0 = 20$ , en (d) se ha superpuesto el filtro sobre el espectro de Fourier para determinar la frecuencia de corte y finalmente en (e) se muestra la imagen filtrada.

### 3.4. Ronchigramas con Longitud de Onda Equivalente

En esta Sección se describen los pasos a seguir para generar un Ronchigrama con longitud de onda equivalente a partir de dos Ronchigramas  $R_1$  y  $R_2$  registrados con  $\lambda_1$  y  $\lambda_2$ , respectivamente. Estos pasos son,

- Aplicar el mejoramiento conocido como corrección gamma a  $R_1$  y  $R_2$ .
- Generar el Ronchigrama con longitud de onda equivalente,  $R_{eq}$ , implementando la Ec. (2.11) o mediante la diferencia entre  $R_1$  y  $R_2$ .
- Calcular el espectro de frecuencias de  $R_{eq}$  mediante la Transformada de Fourier,  $TF$ , y determinar el valor de la frecuencia de corte,  $D_0$  del filtro Gaussiano.
- Filtrar el espectro de  $R_{eq}$  con el  $D_0$  del paso anterior.
- Aplicar la transformada inversa de Fourier,  $TF^{-1}$ , para observar las franjas con longitud de onda equivalente.

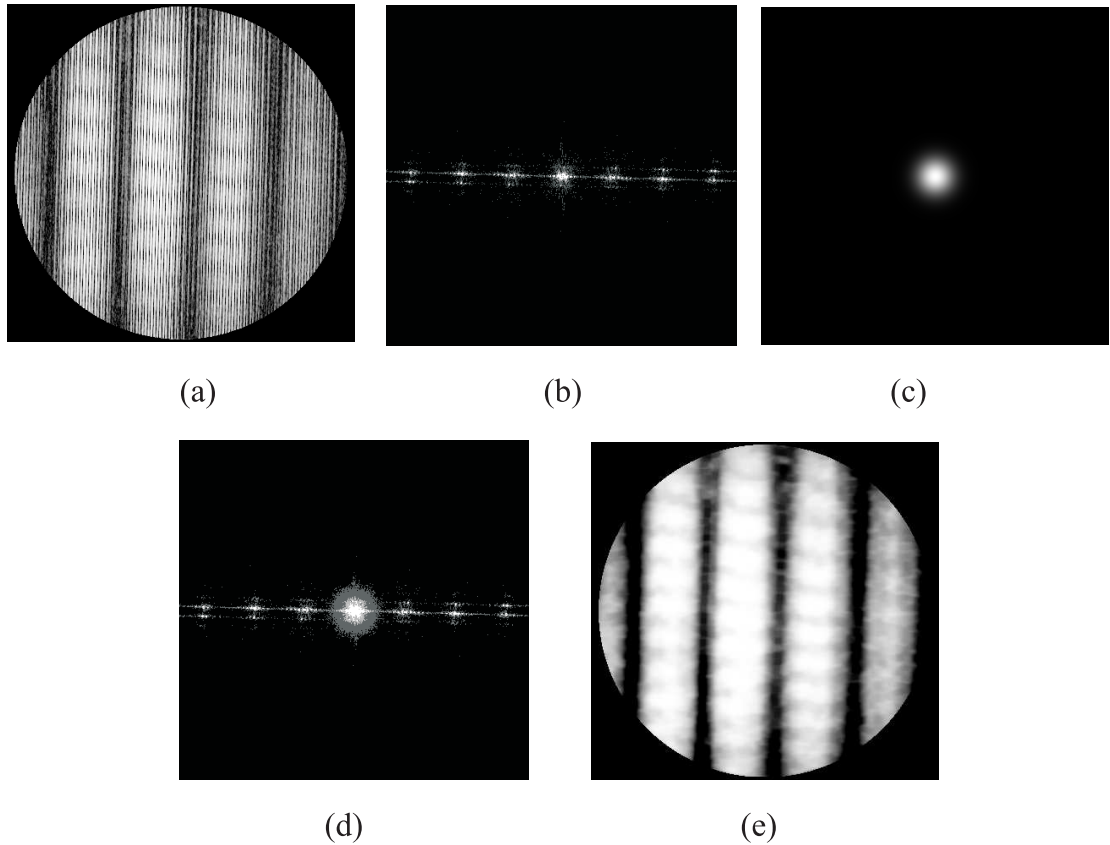


Figura 3.9: Filtrado pasabajas de los Ronchigramas con longitud de onda equivalente.

En el diagrama de flujo de la Fig. 3.10 se presentan las instrucciones para conseguir Ronchigramas con longitud de onda equivalente basadas en los pasos anteriores. En primer lugar, se requiere buscar el valor de  $\gamma$  con el que se distinga mejor el Ronchigramas con longitud de onda equivalente, por lo que se tiene que probar algunos valores para  $\gamma$  hasta hallar un valor óptimo. La diferencia entre  $R_1$  y  $R_2$  para generar  $R_{eq}$  es una alternativa a la Ec. (2.11) y que predice de igual manera el patrón resultante. Sin embargo, se debe tener presente que esta diferencia genera el complemento del patrón generado por la Ec. (2.11). El siguiente paso consiste en calcular la transformada de Fourier de  $R_{eq}$  y mediante la superposición del filtro Gaussiano determinar un valor adecuado para  $D_0$ ; para después realizar la multiplicación del filtro por el espectro de frecuencias y realizar el filtraje correspondiente. Finalmente, la aplicación de la transformada inversa de Fourier dará el Ronchigramas con longitud de onda equivalente esperado.

En el apéndice A se presenta el código en el Software MathCad de los programas realizados en este Capítulo.

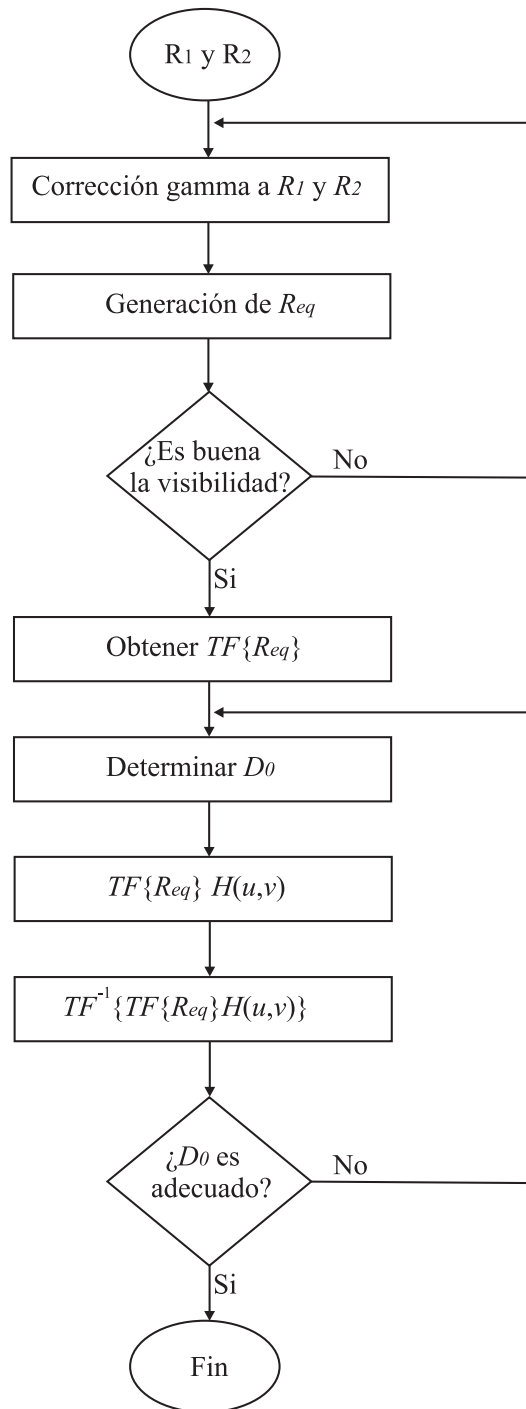


Figura 3.10: Diagrama de flujo para determinar Ronchigramas con longitud de onda equivalente.

# Capítulo 4

## Procedimientos y Resultados

### 4.1. Arreglo Experimental

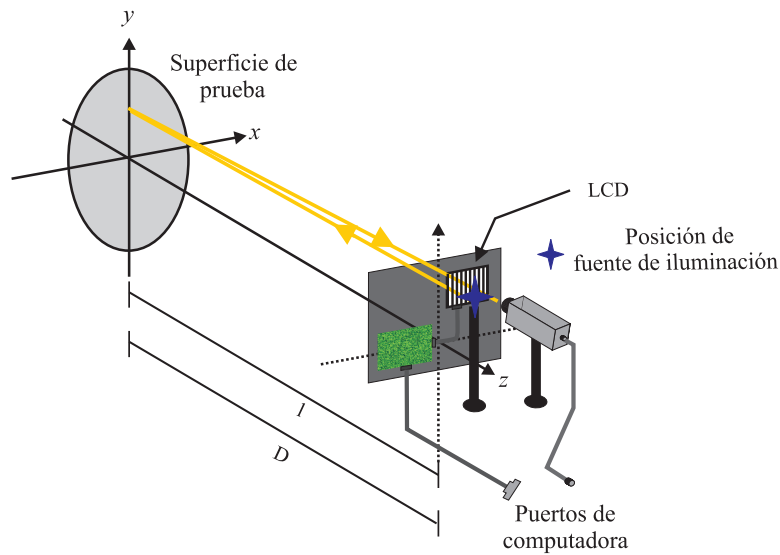


Figura 4.1: Esquema del experimento utilizado en la prueba de Ronchi con longitud de onda equivalente.

El esquema del arreglo experimental utilizado en este trabajo se presenta en la Fig. 4.1. En esta figura se muestra el uso de un *modulador espacial de luz* (XGA2 SLM) para desplegar las rejillas de Ronchi. Este modulador despliega patrones binarios con una resolución espacial máxima de  $1024 \times 768$  píxeles, en donde las dimensiones del píxel son de  $26 \times 19 \mu\text{m}$ . Este

modulador requiere de dos polarizadores cruzados a  $90^0$  para permitir la transmisión a través de éste. Uno de ellos se coloca en la cara dirigida hacia la superficie mientras que el otro se coloca del lado de la fuente de iluminación. Entonces, una vez que se han colocados los polarizadores, el control de la pantalla se realizará mediante una computadora. Para ello, se necesita únicamente de un cable VGA-VGA M-M de modo que al enviar la señal de video de la computadora es posible observar la información enviada en el modulador espacial de luz. De esta manera, al desplegar en la pantalla de la computadora una imagen de  $1024 \times 768$  pixeles estaremos utilizando completamente la parte activa del modulador.



Figura 4.2: Circuito de control y LED ultra brillante utilizados en este trabajo.

En el arreglo presentado en la Fig. 4.1, junto al modulador se ha colocado la cámara CCD y la fuente de iluminación. En este trabajo se utilizó una cámara CCD de video blanco y negro de la marca Sony modelo XC-ST50, con tamaño del CCD de  $7.95 \times 6.45\text{mm}$  y tamaño de pixel de  $8.4 \times 9.8\mu\text{m}$ . Por otro lado, como fuente de iluminación se utilizó un LED comercial ultra brillante de luz blanca [33]. En la Fig. 4.2 se presenta este dispositivo junto con el

circuito de control diseñado e implementado en este trabajo. Esta fuente de iluminación tiene una intensidad mayor que otros diodos comerciales lo que permite capturar imágenes con ruido escaso o nulo. En la Fig. 4.2 (a) se muestra la distribución espectral asociada a este LED. Este LED emite en todas las longitudes de onda del visible con un máximo en

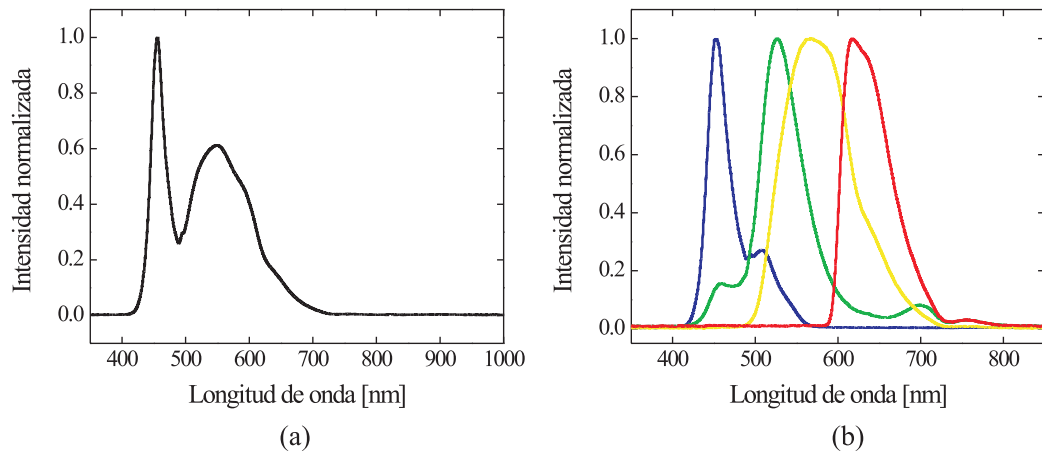


Figura 4.3: Gráficas espectrales de: (a) LED de iluminación y (b) distintos filtros.

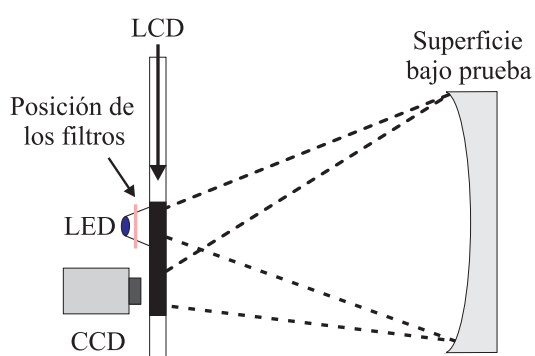
455.84 nm y otro en 549.98 nm. De modo que, para obtener distintas longitudes de onda se utilizaron algunos filtros de papel comercial celofan cuyas características se presentan en la Fig. 4.3 (b). En el Cuadro 4.1 se presentan los máximos para cada una de estas longitudes de onda. En esta prueba, de acuerdo con [6], estos valores son utilizados como la longitud de

Color	Máximo espectral	Ancho espectral (Int.= 0.5)
Azul	452.91 nm	439-471 nm
Verde	526.95 nm	502-560 nm
Amarillo	567.80 nm	523-619 nm
Rojo	617.83 nm	601-666 nm

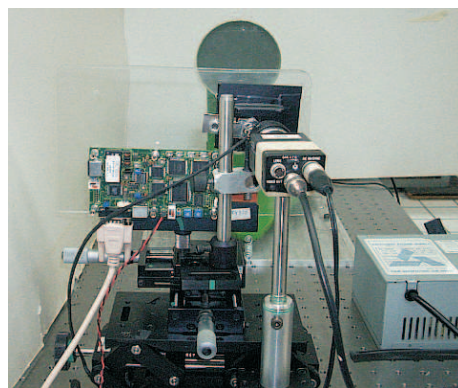
Cuadro 4.1: Máximos espectrales

onda de registro del Ronchigrama para el cálculo de la longitud de onda equivalente. Todos los espectros se obtuvieron con un espectrómetro de fibra óptica controlado por el Software de Ocean Optics *Spectra Suite*.

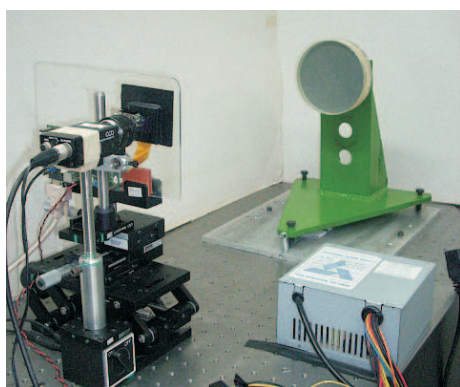
La preferencia de utilizar filtros de colores en lugar de LED's de diferentes longitudes de onda radica en el hecho de que para realizar una comparación adecuada entre dos Ronchigramas registrados con dos longitudes de onda se requiere tener una distribución de intensidad similar entre ambos Ronchigramas como se menciona en el capítulo anterior. En este trabajo se realizaron algunas pruebas con LED's de diferentes longitudes de onda, sin embargo, debido a la complicación para generar un Ronchigramas con longitud de onda equivalente se optó por utilizar un único LED con distintos filtros de modo que la distribución en los Ronchigramas sea la misma para diferentes longitudes de onda.



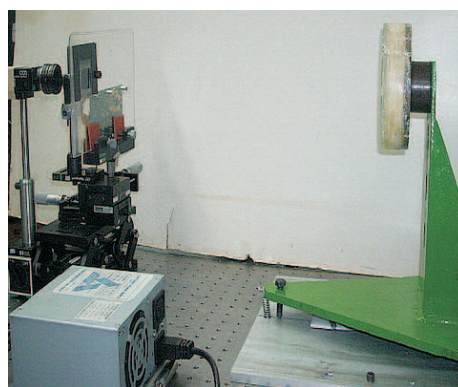
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4.4: Arreglo experimental utilizado en este trabajo. (a), esquema de la prueba; (b), vista frontal de la prueba; (c) y (d) vistas laterales.

Una vez que se cuentan con los elementos para realizar la prueba se montó el arreglo presentado en la Fig. 4.4. En este arreglo, la pantalla de cristal líquido se colocó en una montura  $x - y$  para moverse hacia un lado u otro y hacia adelante o atrás y en un elevador



para manejar la altura de la pantalla; esto permite alinear con mejor precisión la superficie. Por otra parte, la fuente de voltaje de computadora que se observa en esta figura se utilizó para alimentar la pantalla de cristal líquido, la cual requiere de un voltaje de corriente directa de 5 Volts. Además, en este trabajo, se diseñó una base metálica para sostener la montura de la lente (en color verde) para tener un mejor control sobre la superficie bajo prueba. Finalmente, este sistema utiliza dos computadoras. La primera para controlar la pantalla de cristal líquido y la segunda para realizar el registro de los Ronchigramas.

En este trabajo se utilizó como modelo para la generación de Ronchigramas con longitud de onda equivalente un espejo cóncavo con las siguientes características:

- Superficie esférica,
- Diámetro 12.81 cm,
- radio de curvatura 50 cm.

En la siguiente sección se presentan los resultados principales de esta superficie con rejillas clásicas y sub-estructuradas. Aunque no se presenta la evaluación para otras superficies, esta propuesta puede ser empleada para evaluar una gran variedad de superficies y sistemas ópticos. Principalmente, puede ser muy útil en el diseño de superficies en el infrarrojo ya que para la evaluación en alguna longitud de onda en particular únicamente se requieren las longitudes de onda del visible necesarias; las cuales pueden obtenerse fácilmente mediante el diseño de los filtros correspondientes.

## 4.2. Evaluación con Rejillas clásicas y sub-estructuradas

En esta sección se presentan algunos Ronchigramas con longitud de onda equivalente obtenidos en este trabajo. Estos Ronchigramas fueron obtenidos utilizando el arreglo experimental mostrado en la Fig. 4.4 y mediante la aplicación de los procedimientos presentados en el Capítulo 3.

En primer lugar se presenta la evaluación con rejillas tradicionales, para la cual se utilizaron las longitudes de onda verde  $\lambda_1 = 526.95$  nm y rojo  $\lambda_2 = 617.83$  nm, la distancia entre la rejilla y la superficie es de  $l = 46.5$  cm y se utilizó una frecuencia de 384 líneas por centímetro, desplegando cada línea de la rejilla en tres pixeles, de modo que el periodo de

la rejilla es  $p = 156\mu\text{m}$ . En la Fig. 4.5 se muestran los resultados de esta evaluación. Todas las imágenes en esta figura son de tamaño de  $425 \times 430$  píxeles y el tamaño de la pupila de salida del espejo, diámetro de la superficie, es de 12.81 cm equivalente a 420 píxeles. En (a) se muestra el Ronchigramma capturado con  $\lambda_1$ ; en (b) se muestra el Ronchigramma capturado con  $\lambda_2$ ; y en (c) se muestra el patrón generado con longitud de onda equivalente  $\lambda_{eq}$ .

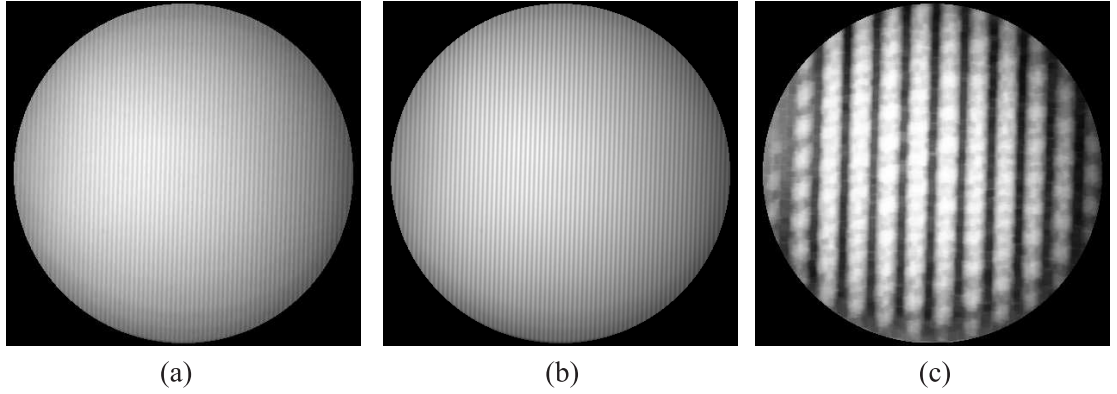


Figura 4.5: Generación de Ronchigramas con longitud de onda equivalente y rejillas tradicionales. (a) Ronchigramma registrado con  $\lambda_1$ ; (b) Ronchigramma registrado con  $\lambda_2$ ; (c) Ronchigramma generado con  $\lambda_{eq}$ .

Para observar mejor el tipo de rejilla utilizado en los Ronchigramas y para poder analizarlos en la Fig. 4.6 se muestra una parte del perfil de la fila central de cada Ronchigramma de la Fig. 4.5. Experimentalmente se midieron los periodos de los Ronchigramas (a) y (b) de

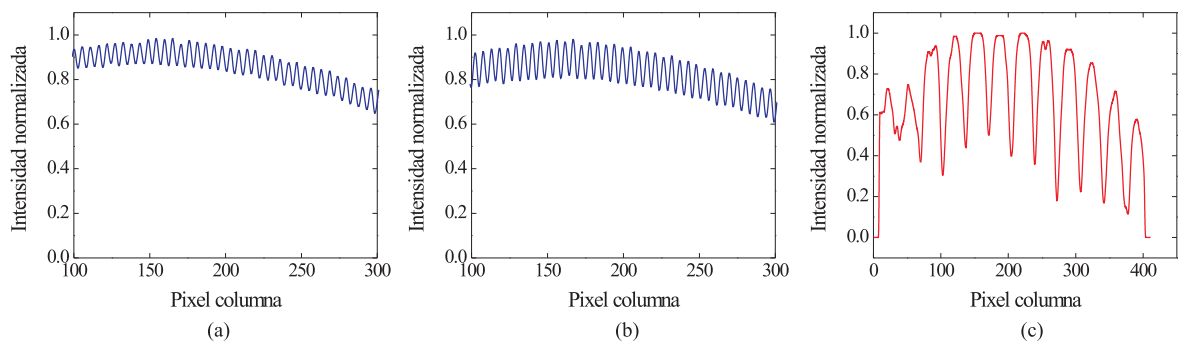


Figura 4.6: Perfiles de la fila central de los Ronchigramas presentados en la Fig. 4.5. (a), parte del perfil para  $\lambda_1$ ; (b), parte del perfil para  $\lambda_2$ ; (c), perfil para  $\lambda_{eq}$ .

la Fig. 4.5 y se encontro un periodo de 5 pixeles para el primer Ronchigrama y uno de 6 pixeles para el segundo. Utilizando la Ec. (1.15) y los datos previamente mencionados, el periodo calculado entre franjas del Ronchigrama con longitud de onda verde, Fig. 4.5 (a), es de  $d = 1.5707$  mm que equivale a 5.14 pixeles en la imagen registrada y que concuerda con el valor medido. Para el Ronchigrama registrado con longitud de onda roja, Fig. 4.5 (b), el periodo calculado entre franjas es de  $d = 1.8146$  mm que equivale a 6.03 pixeles en la imagen registrada y que concuerda con el valor medido. Vemos entonces que con la frecuencia de la rejilla utilizada y las longitudes de onda empleadas existe un cambio entre el periodo de los Ronchigramas el cual permite la generación del patrón con longitud de onda equivalente. Para el Ronchigrama con longitud de onda equivalente se midió un periodo de 36 pixeles que corresponde a  $d = 1.098$  cm y para el cual, utilizando la Ec. (1.15) con la distancia  $l$  a la que fueron tomados los Ronchigramas en el visible se tiene una longitud de onda de  $\lambda_{eq} = 3.68\mu\text{m}$ . Mientras que el valor teórico, calculado con la Ec. (2.19) es  $\lambda_{eqR} = 3.58\mu\text{m}$ . El cual es cercano al valor obtenido experimentalmente. La diferencia entre estas cantidades se debe al hecho de que la determinación del periodo del Ronchigrama con longitud equivalente presenta un error al determinarlo digitalmente, pues la medición entre dos máximos del Ronchigrama es una cantidad entera, estando el error en la parte fraccionaria omitida.

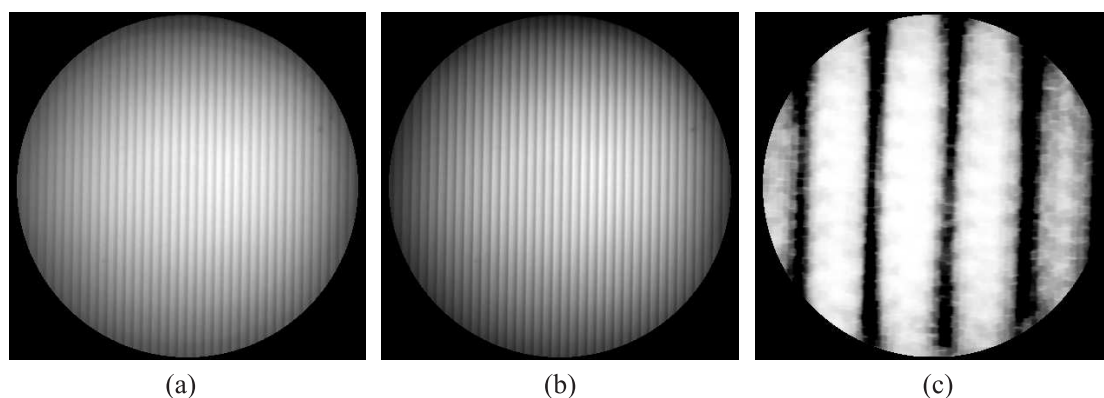


Figura 4.7: Generación de Ronchigramas con longitud de onda equivalente y rejilla sub-estructurada positiva de 5 bits. (a) Ronchigrama registrado con  $\lambda_1$ ; (b) Ronchigrama registrado con  $\lambda_2$ ; (c) Ronchigrama generado con  $\lambda_{eq}$ .

En la Fig. 4.7 se presenta la evaluación con una rejilla sub-estructurada positiva de 5 bits. Esta secuencia fue presentada previamente en la Fig. 1.11. para la captura de este

Ronchigrama la distancia entre la rejilla de Ronchi y la superficie fue de  $l = 47.5$  cm, el periodo utilizado fue de un pixel por bit, i.e.,  $p = 130\mu\text{m}$  y las longitudes de onda empleadas fueron, Fig. 4.7 (a), amarillo- $\lambda_1$  y Fig. 4.7 (b), rojo- $\lambda_2$ . Utilizando los perfiles correspondientes a cada uno de estos Ronchigramas, Fig. 4.8, se midio para el Ronchigrama registrado con  $\lambda_1$  un periodo de  $d = 6.75$  pixeles. Valor determinado mediante el promedio de varios periodos. De la misma manera, para el Ronchigrama registrado con  $\lambda_2$  se midio un periodo de  $d = 7.41$  pixeles. Por otro lado, el cálculo experimental para el periodo del Ronchigrama registrado con

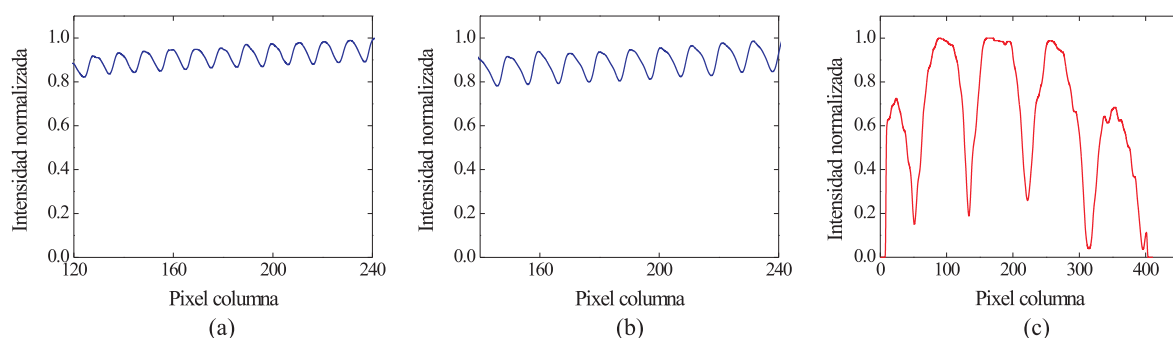


Figura 4.8: Perfiles de la fila central de los Ronchigramas presentados en la Fig. 4.7. (a), parte del perfil para  $\lambda_1$ ; (b), parte del perfil para  $\lambda_2$ ; (c), perfil para  $\lambda_{eq}$ .

longitud de onda amarilla es de  $d = 2.074$  mm que equivale a 6.8 pixeles, lo cual concuerda con el valor experimental. Para el Ronchigrama registrado con longitud de onda roja se tiene  $d = 2.257$  mm que equivale a 7.4 pixeles y que concuerda con el valor experimental. Para el Ronchigrama con longitud de onda equivalente generado con esta rejilla, Fig. 4.7 (c), el periodo calculado de las franjas es de  $d = 2.561$  cm que equivale a 83.96 pixeles; por otro lado el periodo medido entre franjas se encuentra alrededor de 88 pixeles, con una variación de  $\pm 5$  pixeles entre franjas.

En la Fig. 4.9 se presenta la evaluación con una rejilla sub-estructurada de 5 bits negativa. En este ejemplo se observa como una mala alineación, conocida como viñeteo<sup>1</sup>, en la alineación de la superficie ocasiona que en el Ronchigrama con longitud de onda equivalente, Fig. 4.9 (c), no se distingan claramente las franjas en la parte derecha de la imagen. Este

<sup>1</sup>De acuerdo con la Fig. 4.4 (a), este error surge cuando la superficie tiene cierta inclinación con respecto a la rejilla de modo que el máximo de intensidad se mueve hacia un lado u otro en el Ronchigrama registrado.

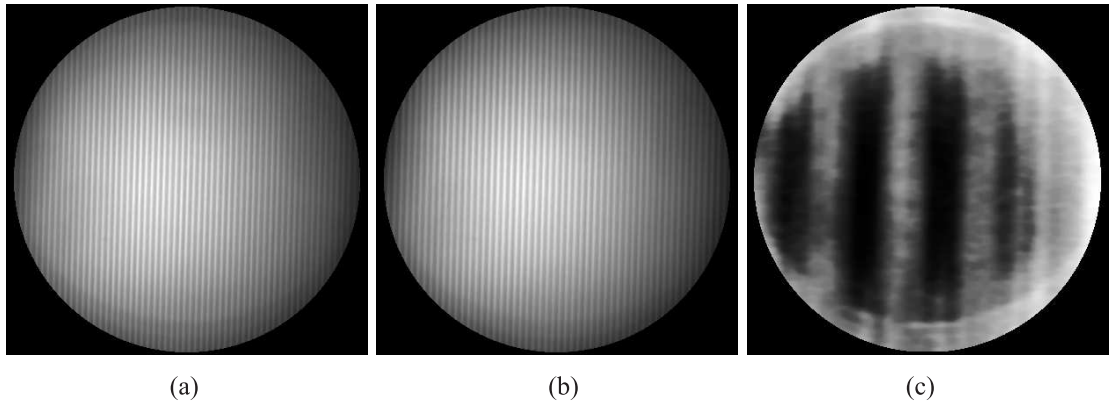


Figura 4.9: Generación de Ronchigramas con longitud de onda equivalente y rejilla sub-estructurada negativa de 5 bits. (a) Ronchigrama registrado con  $\lambda_1$ ; (b) Ronchigrama registrado con  $\lambda_2$ ; (c) Ronchigrama generado con  $\lambda_{eq}$ .

efecto se nota también en los Ronchigramas registrados con las longitudes de onda del visible, Fig. 4.9 (a) y (b), como una región oscura en ambos Ronchigramas. Esto se nota con más claridad en los perfiles de ambos Ronchigramas, Fig. 4.10 (a) y (b), en donde vemos que en el extremo derecho de ambos perfiles la variación de la intensidad es muy baja. Aún cuando la aplicación de la corrección gamma, con  $\gamma = 0.6$ , hace que ambos Ronchigramas sean más parecidos, generando las franjas centrales del Ronchigrama con longitud de onda equivalente, se observa que el efecto de alineamiento afecta claramente los resultados finales Fig. 4.10 (c).

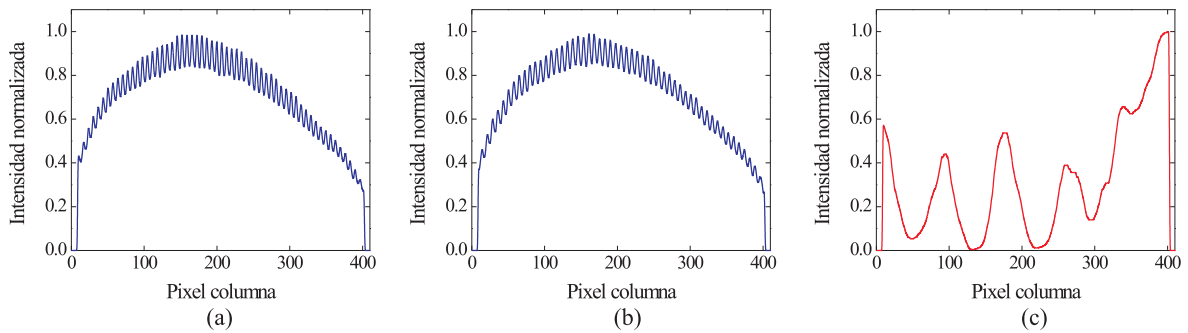


Figura 4.10: Perfiles de la fila central de los Ronchigramas presentados en la Fig. 4.9. (a), parte del perfil para  $\lambda_1$ ; (b), parte del perfil para  $\lambda_2$ ; (c), perfil para  $\lambda_{eq}$ .

Entonces, una de las precauciones que se debe tener en la generación de patrones con longitud de onda equivalente, es que en el registro de los Ronchigramas se debe conseguir que el máximo de intensidad caiga en el centro de la imagen, lo cual no es complicado, pero debe estar presente para la consecución de resultados aceptables.

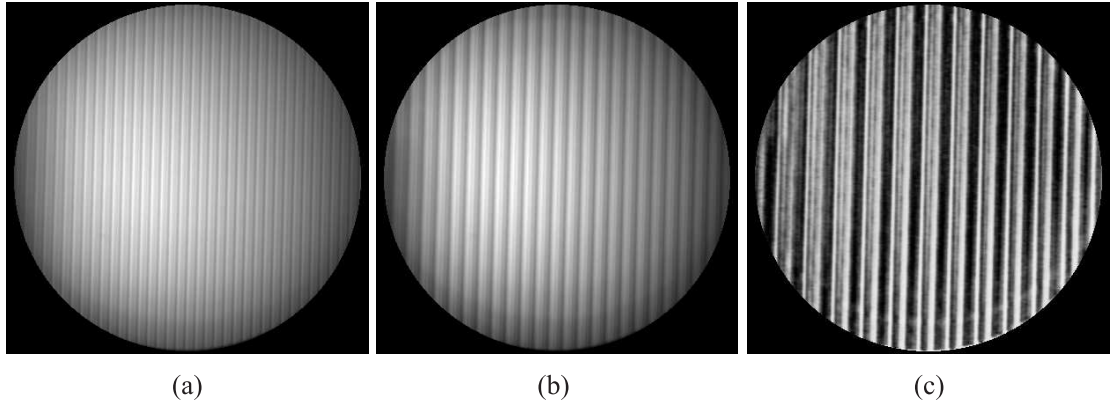


Figura 4.11: Generación de Ronchigramas con longitud de onda equivalente y rejilla sub-estructurada positiva de 7 bits. (a) Ronchigrama registrado con  $\lambda_1$ ; (b) Ronchigrama registrado con  $\lambda_2$ ; (c) Ronchigrama generado con  $\lambda_{eq}$ .

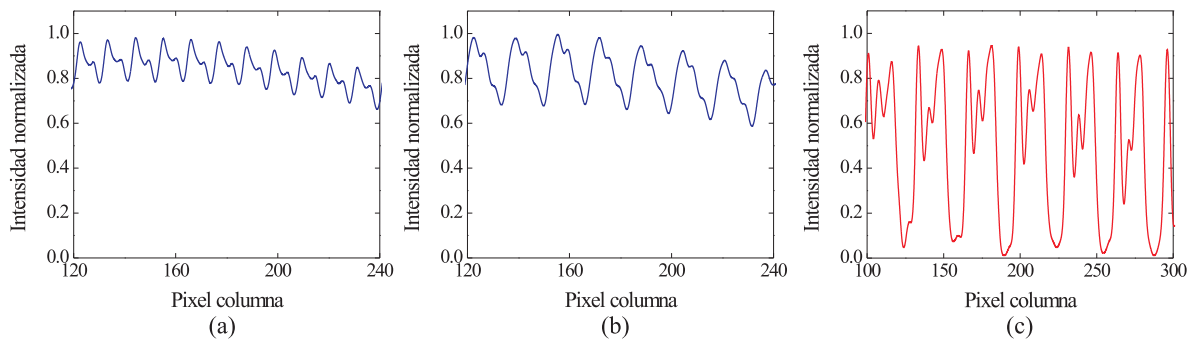


Figura 4.12: Perfiles de la fila central de los Ronchigramas presentados en la Fig. 4.11. (a), parte del perfil para  $\lambda_1$ ; (b), parte del perfil para  $\lambda_2$ ; (c), perfil para  $\lambda_{eq}$ .

Para la rejilla sub-estructurada de 7 bits se utilizó un pixel de la pantalla LCD por bit, de modo que el periodo es,  $p = 182\mu\text{m}$ ; y la distancia entre la rejilla y la superficie en el registro de los Ronchigramas es de  $l = 47.5\text{cm}$ . Para mostrar la versatilidad del sistema para generar

patrones con diferentes longitudes de onda equivalente se tomaron tres Ronchigramas con las longitudes de onda azul, amarillo y rojo.

En la Fig. 4.11 se muestra la evaluación del espejo esférico con, (a),  $\lambda_1 = 452.91$  nm, azul y (b),  $\lambda_2 = 567.80$  nm, amarillo. Utilizando los perfiles mostrados en la Fig. 4.12, se tiene que para el Ronchigrama registrado con  $\lambda_1$  el periodo entre las franjas fue de 10.83 pixeles, mientras que para el Ronchigrama registrado con  $\lambda_2$  el periodo de las franjas fue de 16.375 pixeles. Como se puede observar, la diferencia entre periodos es más grande debido a que el periodo de la rejilla es mayor. Con las longitudes de onda utilizadas la longitud de onda equivalente es de  $\lambda_{eq} = 2.238\mu\text{m}$ , con la cual se obtienen alrededor de 12 franjas en el Ronchigrama final, Fig. 4.11 (c). Como se observa en este Ronchigrama y en su perfil correspondiente, Fig. 4.12 (c), la visibilidad de las franjas es buena; para ello se utilizó la corrección gamma con  $\gamma = 0.8$ .

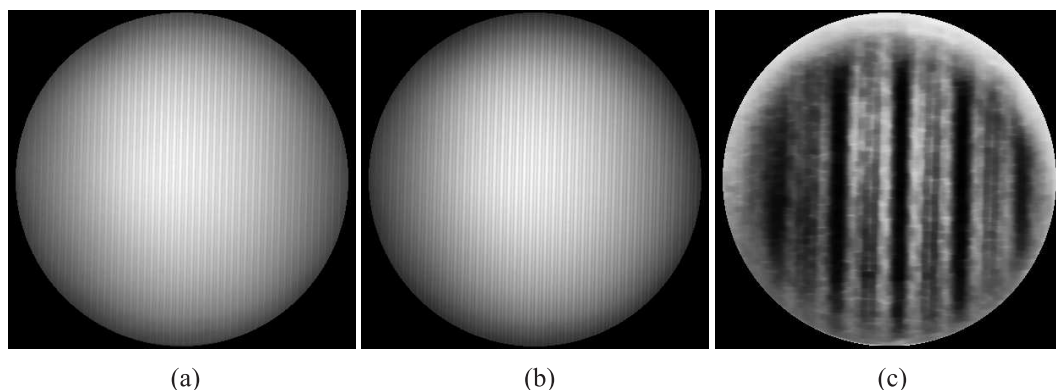


Figura 4.13: Generación de Ronchigramas con longitud de onda equivalente y rejilla sub-estructurada positiva de 7 bits. (a) Ronchigrama registrado con  $\lambda_1$ ; (b) Ronchigrama registrado con  $\lambda_2$ ; (c) Ronchigrama generado con  $\lambda_{eq}$ .

En la Fig. 4.13 se muestra la combinación entre los Ronchigramas con rejilla sub-estructurada de 7 bits registrados con color amarillo y rojo. Como es de esperarse, debido al aumento de la longitud de onda equivalente,  $\lambda_{eq} = 7.011\mu\text{m}$  para estas longitudes de onda, el número de franjas en el Ronchigrama final disminuye por un factor de  $\frac{\lambda_2}{\lambda_1} = 3.132$ . Finalmente, en la Fig. 4.14 se muestran los perfiles de los Ronchigramas presentados en la Fig. 4.13. En este caso, la aplicación de la corrección gamma se hizo con  $\gamma = 0.4$ .

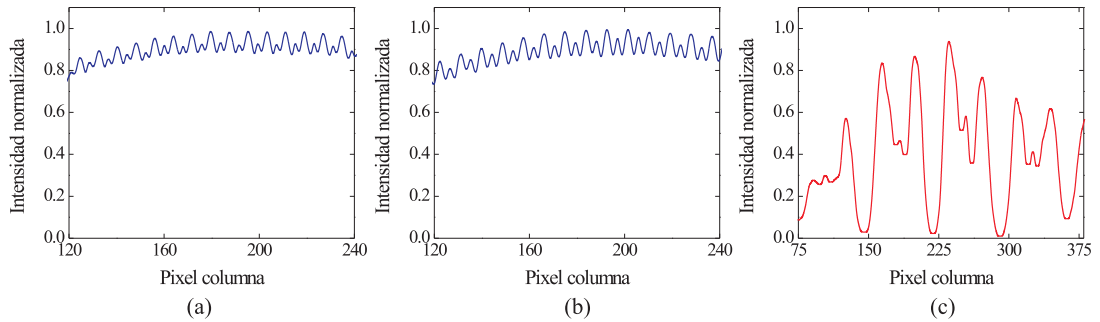


Figura 4.14: Perfiles de la fila central de los Ronchigramas presentados en la Fig. 4.13. (a), parte del perfil para  $\lambda_1$ ; (b), parte del perfil para  $\lambda_2$ ; (c), perfil para  $\lambda_{eq}$ .

### 4.3. Análisis de Datos y Construcción del frente de onda

En esta sección se presenta el análisis del Ronchigrama con longitud de onda equivalente mostrado en la Fig. 4.5 (c) y también se muestran los resultados de la evaluación de la misma superficie con el interferómetro comercial de Fizeau de la marca Zygo [11]. En la Fig. 4.15 se muestra un par de interferogramas obtenidos con este interferómetro. Para

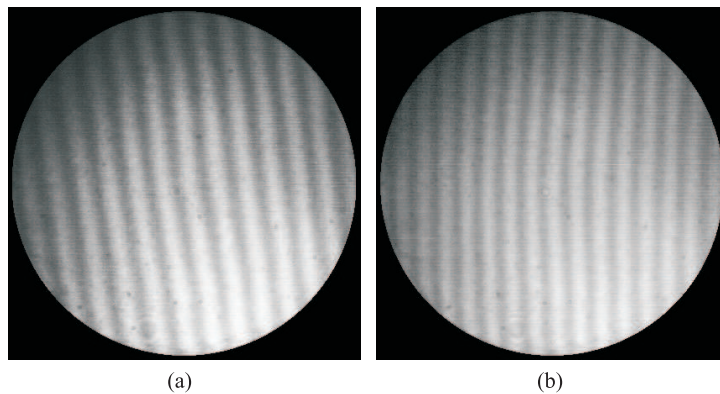


Figura 4.15: Ronchigramas obtenidos con el interferómetro comercial Zygo.

realizar el análisis de estos interferogramas se utilizó el programa comercial Apex. Por otra parte, el análisis del Ronchigrama con longitud de onda equivalente se realizó mediante un programa de análisis de Ronchigramas presentado en [1]. En el Cuadro 4.3 se presentan los coeficientes de algunos polinomios de Zernike obtenidos del Ronchigrama con longitud de onda equivalente y del interferograma mostrado en la Fig. 4.15 (a). Como se puede observar



en esta tabla, los resultados del Ronchigrama con longitud de onda equivalente discrepan con los del interferómetro comercial.

Coeficientes	Ronchigrama	Interferograma	Error
Término constante	2.855	3.055	0.2
Error de foco	-0.095	-0.03	0.06
Inclinación en $y$	-0.13	0.225	0.35
Inclinación en $x$	2.42	2.605	0.18
Aberración esférica	-0.07	-0.03	0.04
Coma en $y$	-0.07	0.02	0.09
Coma en $x$	0.205	-0.005	0.20
Astigmatismo a $45^0$	-0.14	-0.035	0.11
Astigmatismo a $0^0$	-0.215	-0.13	0.08

Cuadro 4.2: Coeficientes de los polinomios de Zernike del Ronchigrama con longitud equivalente de la Fig. 4.5 y del interferograma mostrado en la Fig. 4.15 (a).

En la Fig. 4.16 se presentan las gráficas generadas de los frentes de onda utilizando los coeficientes presentados en la tabla anterior. Como se observa en la figura, la evaluación de la superficie con longitud de onda equivalente discrepa de los resultados obtenidos con el interferómetro comercial. Esta diferencia puede surgir por los procedimientos de análisis empleados en los programas de evaluación. Por esta razón, únicamente se ha estimado el error entre los coeficientes encontrados y no el error porcentual, ya que no se puede aseverar con certeza un valor esperado.

finalmente, en la Fig. 4.17 se presentan las curvas de nivel de los frentes de onda generados para facilitar la comparación entre ambos frentes.

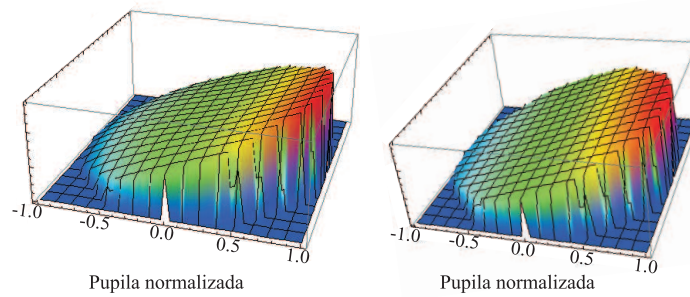


Figura 4.16: Frentes de onda para: (a) Ronchigrama con rejilla tradicional y longitud de onda equivalente;(b) interferograma de la Fig. 4.15.

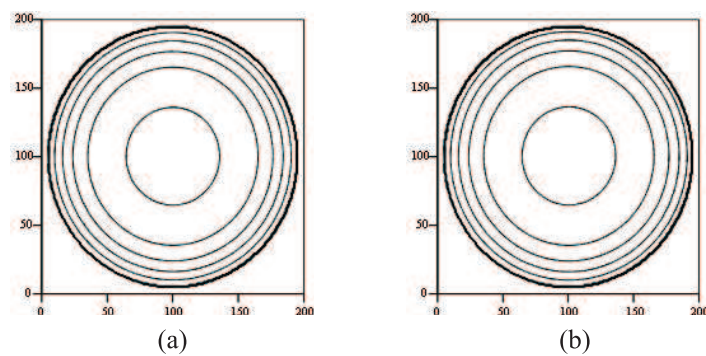


Figura 4.17: Gráficas de nivel de los frentes de onda presentados en la Fig. 4.16.

## 4.4. Ventajas y Desventajas

Una de las principales ventajas de esta propuesta es que se ha mostrado una alternativa, más sencilla y de menor costo, a los métodos interferométricos para generar resultados con longitud de onda equivalente. Esta propuesta puede ser aplicada en el estudio de superficies en el infrarrojo para lo cual se necesita únicamente de los filtros adecuados para generar resultados con la longitud de onda equivalente deseada.

Por otro lado, algunos de los problemas típicos de interferometría con dos longitudes de onda es la sensibilidad de los sistemas a perturbaciones externas. Por ejemplo, los interferogramas presentados en la Fig. 4.15 han sido registrados en la misma posición, pero una ligera perturbación genera un cambio notable en la posición de las franjas. Una de las principales ventajas de esta propuesta es que el periodo de las franjas en el Ronchigrama registrado no es afectado ante perturbaciones externas, de modo que el error introducido en interfer-

ometría con dos longitudes de onda debido a estas razones es casi nulo al utilizar la prueba de Ronchi. Además, de manera análoga a la interferometría con haces múltiples, mediante la cual se obtienen franjas más delgadas para aumentar la precisión de la evaluación de una superficie, una de las principales ventajas del uso de las rejillas sub-estructuradas en esta propuesta es que pueden ser fácilmente desplegadas y generan con mayor facilidad líneas más delgadas en el patron registrado. No obstante, el uso de este tipo de rejillas presenta ciertas limitaciones, pues debido al empleo de periodos pequeños de la rejilla para generar los cambios de fase adecuados entre una longitud de onda y otra, es posible que la sub-estructura se pierda debido a la frecuencia utilizada; de modo que los resultados correspondan a una rejilla tradicional.

# Capítulo 5

## Conclusiones

En el presente capítulo la exposición está organizada de la siguiente manera. En la primera sección se resumen las conclusiones generales referidas al objetivo principal propuesto al inicio de esta tesis. En una segunda sección se resumen las conclusiones específicas relativas a los objetivos particulares señalados al principio de este trabajo. En la tercera sección se hacen explícitos los trabajos derivados de esta tesis, así como las contribuciones realizadas en este trabajo y finalmente, en la última sección se describe el trabajo futuro posible.

### 5.1. Conclusiones generales

Se presentaron los elementos básicos de la *prueba de Ronchi* y del concepto de *longitud de onda equivalente* que sirven para sustentar la generación de Ronchigramas con longitud de onda equivalente. En particular, se describieron los aspectos necesarios de la prueba de Ronchi explicando las condiciones necesarias, como el uso de rejillas de periodos pequeños para generar un cambio de fase entre dos Ronchigramas al ser registrados con distintas longitudes de onda. Además, se presentaron algunas de las condiciones en las que la necesidad de emplear una longitud de onda sintética, analógica o digital, se hace patente, incluyendo varios ejemplos que permitieron profundizar en el modo de operar de este concepto. Asimismo, se presentaron los detalles de la generación digital del Ronchigrama con longitud de onda equivalente utilizando la teoría de los patrones de Moiré. Por otro lado, se describieron las técnicas computacionales del área de *procesamiento digital de imágenes* (PDI), que sirven para la generación digital de Ronchigramas con longitud de onda equivalente, y el modo en que

algunos parámetros de éstas pueden influir en los resultados finales. Por ejemplo, se encontró que la aplicación de la corrección gamma a los Ronchigramas a ser combinados, aumenta la similitud entre ambos después de la aplicación de la técnica, mejorando notablemente la visibilidad de las franjas en los patrones generados. Todas las técnicas computacionales utilizadas en este trabajo se implementaron con el lenguaje de programación propietario de MathCad. Finalmente, se presentaron varios resultados con longitud de onda equivalente para distintos tipos de rejillas, como son las tradicionales y rejillas sub-estructuradas de 5 y 7 bits y se discutieron algunas de las limitaciones para generar patrones con longitud de onda equivalente mediante el sistema utilizado en este trabajo.

## 5.2. Conclusiones adicionales

Se diseñó un circuito para el manejo y control de la intensidad de LED's con distintas longitudes de onda. Aunque varias opciones para generar Ronchigramas con dos longitudes de onda, como el empleo de dos LED's de distintas longitudes de onda o un LED integrado para iluminar en dos longitudes de onda, fueron probadas, la mejor opción es utilizar un LED ultraluminiscente junto con algunos filtros. El uso de dos LED's de distintas longitudes de onda, tiene el inconveniente de que los Ronchigramas registrados de esta manera tienen una distribución de intensidad distinta, de modo que la comparación entre ambos Ronchigramas no genera resultados ya que debe existir homogeneidad entre los Ronchigramas para la generación de resultados. El manejo de un LED integrado tiene el inconveniente de tener una baja intensidad de iluminación, lo cual para algunas superficies, como la evaluada en este trabajo, presenta el inconveniente de que las franjas en los Ronchigramas son apenas perceptibles, aún modificando los parámetros de registro de la cámara, ocasionando que sea difícil poder compararlos. De modo que el LED propuesto junto con los filtros cumple con las características necesarias para generar los patrones con longitud de onda equivalente; homogeneidad entre los patrones registrados e intensidad suficiente para que las franjas en los Ronchigramas estén bien definidas.

En base a los patrones de Moiré se establecieron los procedimientos computacionales a ser implementados para generar Ronchigramas con longitud de onda equivalente. En las etapas de pre-procesamiento se discutió la importancia de la corrección gamma. Además, se implementó un programa para combinar dos Ronchigramas y se propuso el empleo de un filtro Gaussiano

pasabajas así como un procedimiento visual para filtrar la frecuencia correspondiente al Ronchigrama con longitud de onda equivalente.

Empleando las condiciones necesarias para generar un cambio de fase entre dos Ronchigramas, empleando las características del sistema de iluminación mencionadas para registrar dos Ronchigramas con distinta longitud de onda y mediante los procedimientos computacionales implementados, se logró evaluar una superficie con rejilla tradicional y sub-estructurada utilizando longitud de onda equivalente. Algunas de las ventajas y limitaciones del sistema se discutieron en el Capítulo 4. Finalmente, algunos de estos resultados han sido analizados y se han comparado con aquellos de un interferómetro comercial.

### 5.3. Contribuciones específicas

En este trabajo se discutieron los pasos principales para conseguir un Ronchigrama con longitud de onda equivalente. De manera general, las contribuciones por capítulo se listan a continuación:

**Capítulo 1.** En este capítulo se discutieron los principales aspectos de la prueba de Ronchi y de las rejillas, clásicas y sub-estructuradas. Las contribuciones en este capítulo son:

- En la representación de Ronchigramas, se aclaró la interpretación que debe hacerse cuando se utilizan periodos cortos de la rejilla de Ronchi de modo que en lugar de considerar el periodo físico de la rejilla, que desde el punto de vista de la óptica geométrica se proyecta igual para cualquier longitud de onda, se debe de considerar el periodo de las franjas en el Ronchigrama que, bajo las condiciones mencionadas, cambia de acuerdo con la longitud de onda.
- Se ejemplificó, computacionalmente, la generación de las rejillas sub-estructuradas mediante la combinación de dos rejillas clásicas. Para ello se utilizaron los operadores lógicos OR y AND para generar rejillas sub-estructuradas positivas y negativas, respectivamente.

**Capítulo 2.** En este capítulo se discutieron el concepto de longitud de onda equivalente y la teoría de los patrones de Moiré para generar Ronchigramas con longitud de onda equivalente. Las contribuciones en este capítulo son:

- Mediante las Figs. 2.1, 2.2 y 2.3 se propuso un ejemplo para dilucidar las limitaciones de interferometría con una longitud de onda.
- Se propuso un ejemplo visual de  $\lambda_{eq}$ , Fig. 2.4, que puede servir en la selección de dos longitudes de onda del visible en la evaluación de superficies en el IR.
- Se describió, mediante la teoría de Moiré, la manera en que se deben combinar dos Ronchigramas para generar un patrón con longitud de onda equivalente así como también se propuso un filtro pasabajos para seleccionar el patrón con longitud de onda equivalente.

**Capítulo 3.** En este capítulo se discutieron los algoritmos computacionales, y su influencia, para generar Ronchigramas con longitud de onda equivalente. Las contribuciones en este capítulo son:

- Se discutió la corrección gamma como una herramienta para aumentar la similaridad entre los Ronchigramas a ser combinados con el efecto de incrementar la visibilidad en el patrón final.
- Se presentó un procedimiento visual en la selección de frecuencias del espectro de Fourier del resultado directo de la combinación de dos Ronchigramas.
- Se ejemplifico mediante un diagrama de flujo, Fig. 3.10, un procedimiento que puede seguirse para encontrar Ronchigramas con longitud de onda equivalente.

**Capítulo 4.** En este capítulo se presentaron los aspectos principales del arreglo utilizado en este trabajo y algunos resultados con rejillas clásicas y sub-estructuradas. Las contribuciones en este capítulo son:

- Se presentaron los aspectos más importantes de la fuente de iluminación y del sistema utilizado en este trabajo.
- Se presentaron y discutieron resultados con rejillas clásicas y sub-estructuradas.
- Se discutieron las principales ventajas y desventajas encontrados en este trabajo.
- Se compararon los resultados con un interferómetro comercial, tipo Fizeau, de la compañía Zygo.

## 5.4. Trabajos Relacionados y Participación en otras publicaciones

Algunos de los trabajos relacionados con este trabajo son:

- García-Arellano, A.\*, Granados-Agustín, F. and Cornejo-Rodríguez, A., “Wavefront Determination Using the Ronchi Test with Synthetic Wavelength,” Proceedings of SPIE Vol. 8011, (2011). Presentado en el 22 Congreso General de la Comisión Internacional de Óptica, ICO-22, 2011.
- Granados-Agustín, F. S.\*, García-Arellano, A., Aguirre-Aguirre, D., Campos-García, M., and Cornejo-Rodríguez, A., “Ronchigram analysis based on effective wavelength techniques and wavefront slope,” Proceedings of SPIE Vol. 8083, (2011). Presentado en Modeling Aspects in Optical Metrology III, 2011.
- García A. A.\*, Granados A. F., and Cornejo R. A., “Ronchi test with equivalent wavelength,” Proceedings of SPIE Vol. 7584, (2010). Presentado en Laser Applications in Microelectronic and Optoelectronic Manufacturing XV, 2010.
- Además, el trabajo “Ronchi test with equivalent wavelength,” para la revista Applied Optics se encuentra bajo evaluación. Enviado el 5 de Octubre de 2011.

Participación durante el doctorado en otros trabajos:

- Urcid S. G., Nieves J. A.\*, García A. A., and Valdiviezo-N J. C., “Robust image retrieval from noisy inputs using lattice associative memories,” Proceedings of SPIE Vol. 7245, (2009). Presentado en Image Processing: Algorithms and Systems VII, 2009.
- García A. A.\*, Castro R. J., Urcid S. G., et. al., “Optical surface quality determination using the Ronchi test and morphological skeletonization,” Memorias de la AMO, 14:1–7, Octubre 2008. Sesión mural-LI Congreso Nacional de Física y XXI reunión Anual de la AMO, Zacatecas, 2008.
- Valdiviezo-N J. C.\*, Urcid S. G., García A. A., “Segmentation of hyperspectral imagery using strongly lattice independent sets,” Memorias de la AMO, 15:1–13, Octubre 2008.



Sesión mural-LI Congreso Nacional de Física y XXI reunión Anual de la AMO, Zacatecas, 2008.

Finalmente, como parte de una estancia realizada durante el doctorado en la escuela de óptica en la universidad de Santiago de Compostela, España, bajo la dirección de la Dra. Eva Acosta Plaza se tienen los siguientes trabajos:

- García-Arellano, A.\*, Gómez-García, M., and Acosta-Plaza, E., “Optical pressure sensor based on the combined system of a variable liquid lens and a point diffraction interferometer,” Artículo aceptado para publicación en Applied Optics, (2011).
- García-Arellano, A.\*, Gómez-García, M., and Acosta-Plaza, E., “Optical pressure sensor based on liquid lenses and the point diffraction interferometer,” Proceedings of SPIE Vol. 8011, (2011). Presentado en el 22 Congreso General de la Comisión Internacional de Óptica, ICO-22, 2011.

## 5.5. Trabajo futuro

El trabajo a futuro consistirá en analizar distintas superficies, lentes y sistemas ópticos completos con esta prueba para establecer las limitaciones en las que esta propuesta puede ser aplicada. En este proceso se podría aumentar el control por computadora de algunas partes del sistema con el objetivo de automatizar esta propuesta. Por otra parte, es de interés profundizar en el estudio de algoritmos de análisis de Ronchigramas, en donde se podrían aplicar distintas técnicas de PDI, así como técnicas de otras áreas como la morfología matemática y la lógica difusa, de modo que se incrementen y generen nuevas herramientas necesarias para analizar Ronchigramas con rejillas sub-estructuradas.

# Apéndice A

## Ejemplos de Algoritmos

En este apartado se presentan algunos algoritmos realizados en el programa de paquetería MathCad. Estos algoritmos corresponden a los procedimientos del Capítulo 3 para generar Ronchigramas con longitud de onda equivalente. En todos los programas presentados, la salida es una imagen almacenada en la variable R.

### A.1. Corrección-gamma

Este algoritmo corresponde a la sección 3.2, Mejoramiento de Ronchigramas.

$$\text{Gam}(A, \gamma, c) := \left| \begin{array}{l} m \leftarrow \text{rows}(A) \\ n \leftarrow \text{cols}(A) \\ \text{for } i \in 0..m-1 \\ \quad \text{for } j \in 0..n-1 \\ \quad \quad R_{i,j} \leftarrow (A_{i,j})^\gamma \\ R \leftarrow R \cdot c \\ R \end{array} \right.$$

Figura A.1: Algoritmo para aplicar la corrección-gamma a una imagen A.

Los parámetros de entrada a este algoritmo son:

- A: La imagen de entrada
- $\gamma$ : El valor de la corrección.

- c: Un factor de escala.

## A.2. Longitud de onda equivalente

El programa para generar ronchigramas con longitud de onda equivalente se presenta en la Fig. A.2.

```

Sintetica(A,B,b) :=
  m ← rows(A)
  n ← cols(A)
  if b = 0
    for i ∈ 0..m-1
      for j ∈ 0..n-1
        M ← if(Ai,j = Bi,j, continue,  $\frac{A_{i,j} \cdot B_{i,j}}{|A_{i,j} - B_{i,j}|}$ )
      Ri,j ← M
  if b = 0
    max ← max(R)
    for i ∈ 0..m-1
      for j ∈ 0..n-1
        M ← if(Ai,j = Bi,j, max, Ri,j)
      Ri,j ← M
  if b ≠ 0
    for i ∈ 0..m-1
      for j ∈ 0..n-1
        D ← |Ai,j - Bi,j|
      Ri,j ← D
  R

```

Figura A.2: Algoritmo para generar Ronchigramas con longitud de onda sintética.

Los parámetros de entrada a este programa son:

- A: Ronchigrama registrado con  $\lambda_1$ .
- B: Ronchigrama registrado con  $\lambda_2$ .
- b: Parámetro de control para seleccionar la manera de generar los Ronchigramas.  $b = 0$ , por multiplicación;  $b \neq 0$ , por diferencia.

### A.3. Filtrado Gaussiano Pasabajas

Finalmente, en la Fig. A.3 se presenta el Filtro Gaussiano pasabajas, correspondiente a la Sección 3.3.

$$\text{GLPF}(M, N, D_0) := \left| \begin{array}{l} w \leftarrow -0.5 \cdot D_0^{-2} \\ h \leftarrow 0.5 \cdot M \\ k \leftarrow 0.5 \cdot N \\ \text{for } u \in 0..M-1 \\ \quad \text{for } v \in 0..N-1 \\ \quad \quad R_{u,v} \leftarrow \exp[w \cdot [(u-h)^2 + (v-k)^2]] \\ R \end{array} \right.$$

Figura A.3: Algoritmo del filtro Gaussiano pasabajas.

Los parámetros de entrada a este programa son:

- M: Filas del filtro.
- N: Columnas del filtro.
- $D_0$ : Frecuencia de corte.

# Índice de figuras

1.1. Esquema general de la holografía con dos longitudes de onda. (a), Primera etapa, holograma con $\lambda_1$ . (b), Segunda etapa, iluminación con $\lambda_2$ e interferencia con el holograma registrado con $\lambda_1$ . . . . .	5
1.2. Arreglo experimental para holografía con longitud de onda equivalente con el procedimiento serial. . . . .	6
1.3. Uso de una cámara termoplástica y de un láser de tintura sintonizable para la evaluación de superficies ópticas con longitud de onda equivalente [19]. . . . .	7
1.4. Arreglo experimental para interferometría con longitud de onda equivalente con el procedimiento paralelo. . . . .	8
1.5. Descripción de la aberración transversal medida por la prueba de Ronchi. . . . .	9
1.6. Algunos órdenes de difracción generados en la prueba de Ronchi. . . . .	10
1.7. Imagen experimental que muestra a la prueba de Ronchi como un interferómetro de desplazamiento lateral; imagen tomada del Optical Shop Testing 3ra. ed. . . . .	11
1.8. Planos importantes para describir la prueba de Ronchi con la teoría de Fourier. Plano A: pupila de salida de la superficie bajo prueba. Plano B: modulación frecuencial. Plano C: plano imagen. . . . .	11
1.9. Secuencia de una rejilla tradicional, binaria de Ronchi. . . . .	15
1.10. Secuencia sub-estructurada. . . . .	17
1.11. Secuencias sub-estructurada de 5 y 7 bits, positivas y negativas. . . . .	18
1.12. Rejillas sub-estructuradas. (a): positiva de 5 bits, (b): negativa de 5 bits, (c): positiva de 7 bits y (c): negativa de 7 bits. . . . .	18
1.13. ejemplo de la generación de una rejilla sub-estructurada negativa mediante la combinación de dos rejillas clásicas utilizando la operación lógica AND. . . . .	19

2.1.	Superficie parabólica vs superficie plana en el interferómetro de Newton. . . . .	21
2.2.	Superficie parabólica analizada con dos longitudes de onda; $\lambda_1 = 632.8$ nm y $\lambda_2 = 3164$ nm . . . . .	21
2.3.	Ejemplo de evaluación de superficie con un salto en su centro de $\lambda/4$ . . . . .	22
2.4.	Comportamiento de $\lambda_{eq}$ . . . . .	24
2.5.	Representación esquemática de la generación de patrones con longitud de onda equivalente. . . . .	25
2.6.	Generación de patrones de Moiré con: (a), rejillas de la misma frecuencia con inclinación; (b), rejillas de diferente frecuencia sin inclinación; (c), rejillas de diferente frecuencia con inclinación entre ellas. . . . .	27
3.1.	Aparición de ruido tipo sal y pimienta en algunos Ronchigramas debido a baja intensidad en la iluminación. . . . .	33
3.2.	Eliminación de ruido tipo sal y pimienta utilizando filtros estadísticos. . . . .	35
3.3.	gráficas de la corrección-gamma con $c = 1$ y $\gamma = 0.15, 0.5, 1, 3, 20$ . Se muestra el valor de gamma utilizado sobre cada curva. . . . .	36
3.4.	Perfil de la línea central de un Ronchigrama para distintos valores de $\gamma$ . . . . .	37
3.5.	Incremento de la visibilidad en Ronchigramas con longitud de onda equivalente mediante la aplicación de la corrección-gamma. Ronchigramas (a) y (b), registrados con distintas longitudes de onda, sin aplicación de mejoramiento, $\gamma = 1$ ; (c) Ronchigrama con longitud de onda equivalente generado con los Ronchigramas (a) y (b). Los Ronchigramas (d) y (e) son los resultados del mejoramiento con $\gamma = 0.6$ a los Ronchigramas (a) y (b), respectivamente; (f), Ronchigrama con longitud de onda equivalente generado con los Ronchigramas (d) y (e). . . . .	39
3.6.	Ronchigramas con longitud de onda equivalente. (a), obtenido sin la aplicación de la corrección gamma. (b), Ronchigrama obtenido con $\gamma = 0.6$ . . . . .	40
3.7.	Ronchigramas con longitud de onda equivalente. (a), con $\gamma = 0.8$ y (b), $\gamma = 0.2$ . . . . .	40
3.8.	Características principales del Filtro Gaussiano pasabajas. . . . .	42
3.9.	Filtrado pasabajas de los Ronchigramas con longitud de onda equivalente. . . . .	43
3.10.	Diagrama de flujo para determinar Ronchigramas con longitud de onda equivalente. . . . .	45
4.1.	Esquema del experimento utilizado en la prueba de Ronchi con longitud de onda equivalente. . . . .	46

4.2.	Circuito de control y LED ultra brillante utilizados en este trabajo. . . . .	47
4.3.	Gráficas espectrales de: (a) LED de iluminación y (b) distintos filtros. . . . .	48
4.4.	Arreglo experimental utilizado en este trabajo. (a), esquema de la prueba; (b), vista frontal de la prueba; (c) y (d) vistas laterales. . . . .	49
4.5.	Generación de Ronchigramas con longitud de onda equivalente y rejillas tradicionales. (a) Ronchigrama registrado con $\lambda_1$ ; (b) Ronchigrama registrado con $\lambda_2$ ; (c) Ronchigrama generado con $\lambda_{eq}$ . . . . .	51
4.6.	Perfiles de la fila central de los Ronchigramas presentados en la Fig. 4.5. (a), parte del perfil para $\lambda_1$ ; (b), parte del perfil para $\lambda_2$ ; (c), perfil para $\lambda_{eq}$ . . . . .	51
4.7.	Generación de Ronchigramas con longitud de onda equivalente y rejilla sub-estructurada positiva de 5 bits. (a) Ronchigrama registrado con $\lambda_1$ ; (b) Ronchigrama registrado con $\lambda_2$ ; (c) Ronchigrama generado con $\lambda_{eq}$ . . . . .	52
4.8.	Perfiles de la fila central de los Ronchigramas presentados en la Fig. 4.7. (a), parte del perfil para $\lambda_1$ ; (b), parte del perfil para $\lambda_2$ ; (c), perfil para $\lambda_{eq}$ . . . . .	53
4.9.	Generación de Ronchigramas con longitud de onda equivalente y rejilla sub-estructurada negativa de 5 bits. (a) Ronchigrama registrado con $\lambda_1$ ; (b) Ronchigrama registrado con $\lambda_2$ ; (c) Ronchigrama generado con $\lambda_{eq}$ . . . . .	54
4.10.	Perfiles de la fila central de los Ronchigramas presentados en la Fig. 4.9. (a), parte del perfil para $\lambda_1$ ; (b), parte del perfil para $\lambda_2$ ; (c), perfil para $\lambda_{eq}$ . . . . .	54
4.11.	Generación de Ronchigramas con longitud de onda equivalente y rejilla sub-estructurada positiva de 7 bits. (a) Ronchigrama registrado con $\lambda_1$ ; (b) Ronchigrama registrado con $\lambda_2$ ; (c) Ronchigrama generado con $\lambda_{eq}$ . . . . .	55
4.12.	Perfiles de la fila central de los Ronchigramas presentados en la Fig. 4.11. (a), parte del perfil para $\lambda_1$ ; (b), parte del perfil para $\lambda_2$ ; (c), perfil para $\lambda_{eq}$ . . . . .	55
4.13.	Generación de Ronchigramas con longitud de onda equivalente y rejilla sub-estructurada positiva de 7 bits. (a) Ronchigrama registrado con $\lambda_1$ ; (b) Ronchigrama registrado con $\lambda_2$ ; (c) Ronchigrama generado con $\lambda_{eq}$ . . . . .	56
4.14.	Perfiles de la fila central de los Ronchigramas presentados en la Fig. 4.13. (a), parte del perfil para $\lambda_1$ ; (b), parte del perfil para $\lambda_2$ ; (c), perfil para $\lambda_{eq}$ . . . . .	57
4.15.	Ronchigramas obtenidos con el interferómetro comercial Zygo. . . . .	57
4.16.	Frentes de onda para: (a) Ronchigrama con rejilla tradicional y longitud de onda equivalente; (b) interferograma de la Fig. 4.15. . . . .	59

4.17. Gráficas de nivel de los frentes de onda presentados en la Fig. 4.16. . . . .	59
A.1. Algoritmo para aplicar la corrección-gamma a una imagen A. . . . .	67
A.2. Algoritmo para generar Ronchigramas con longitud de onda sintética. . . . .	68
A.3. Algoritmo del filtro Gaussiano pasabajas. . . . .	69



# Índice de cuadros

2.1.	En esta tabla se presentan algunas longitudes de onda de un láser de Argón y un láser He-Ne para generar la longitud de onda equivalente. Para cada par de longitudes de onda se presentan tres valores. El primero corresponde al valor de la longitud de onda equivalente calculado de acuerdo a la Ec. (2.5). El segundo valor corresponde al $mcm$ entre ambas longitudes. El tercer valor corresponde a la razón $mcm/\lambda_{eq}$ para observar el incremento que se obtiene al generar el patrón mediante el $mcm$ . .	26
4.1.	Máximos espectrales . . . . .	48
4.2.	Coefficientes de los polinomios de Zernike del Ronchigrama con longitud equivalente de la Fig. 4.5 y del interferograma mostrado en la Fig. 4.15 (a). . . . .	58

# Bibliografía

- [1] Aguirre A. D., *Evaluación del incremento en la precisión de la aberración transversal utilizando rejillas sub-estructuradas* (INAOE, Tesis de maestría, 2010).
- [2] Barakat R., “General Diffraction Theory Of Optical Aberration Tests, from the Point of View of Spatial Filtering” *J. Opt. Soc. Am.* **59**(11), 1432–1439, 1969.
- [3] Brug H. V., Klaver R. G., “On the effective wavelength in two-wavelength interferometry,” *Appl. Opt.* **7**(1998), 1465–1471, 1998.
- [4] Campos G. M., Granados A. F., “Interferometric Ronchi test by using substructured gratings,” *Proc. SPIE* **7390**(2009), 73901B-73901-9, 2009.
- [5] Cornejo A., Malacara D., “Ronchi Test of Aspherical Surfaces, Analysis, and Accuracy,” *Appl. Opt.* **9**(8), 1897-1901, 1970.
- [6] Cornejo R. A., “Ronchi Test,” en *Optical Shop Testing*, Malacara D., editor (Wiley Interscience, 3ra ed., 2007).
- [7] Cheng Y. Y., Wyant J. C., “Two wavelength phase shifting interferometry,” *Appl. Opt.* **23**(24), pp. 4539–4543, 1984.
- [8] Cheng Y. Y., Wyant J. C., “Multiple wavelength phase shifting interferometry,” *Appl. Opt.* **26**(6), pp. 804–807, 1985.
- [9] Creath K., “Step height measurement using two-wavelength phase shifting interferometry,” *Appl. Opt.* **26**(14), 2810–2816, 1987.
- [10] Creath K., Schmit J., and Wyant J. C., “Optical Metrology of Diffuse Surfaces,” en *Optical Shop Testing*, Malacara D., editor (Wiley Interscience, 3ra ed., 2007).
- [11] Forman P. F., “The Zygo interferometer system,” *Proc. SPIE* **0192**, pp. 41–48, 1979.

- [12] García A. A., Granados A. F., Cornejo R. A., “Ronchi test with equivalent wavelength,” Proc. SPIE **7584**(2010), 758418, 2010.
- [13] Gonzalez R. C., Woods R. E., *Digital Image Processing* (Prentice Hall 3ra ed., 2008).
- [14] Groot P. d., Kishner S., “Synthetic wavelength stabilization for two-color laser-diode interferometry,” Appl. Opt. **30**(28), 4026–4033, 1991.
- [15] Hecht E., *Óptica* (Addison Wesley 3ra. ed., 2000).
- [16] Hildebrand B. P., Haines, K. A., “Multiple-Wavelength and Multiple Source Holography Applied to Contour Generation,” J. Opt. Soc. Am. **57**(2), pp. 155–162, 1967.
- [17] Houairi K., Cassaing F., “Two-wavelength interferometry: extended range and accurate optical path difference analytical estimator,” J. Opt. Soc. Am. **26**(12), pp. 2503–2511, 2009.
- [18] Katyl R. H., “Moiré Screens Coded with Pseudo-Random Sequences,” Appl. Opt. **11**(10), 2278–2285, 1972.
- [19] Leung K. M., Lee T. C., Bernal G. E., and Wyant J. C., “Two-wavelength contouring with the automated thermoplastic holographic camera,” Proc. SPIE **0192**, Interferometry, 1979.
- [20] MacGovern A. J., Wyant J. C., “Computer Generated Holograms for Testing Optical Elements,” Appl. Opt. **10**(3), pp. 619–624, 1971.
- [21] Mantravadi M. V., Malacara D., “Newton, Fizeau and Haidinger Interferometers,” en *Optical Shop Testing*, Malacara D., editor (Wiley Interscience, 3ra ed., 2007).
- [22] Meyers W. S, Stahl H. P., “Sensitivity of two-channel Ronchi test to grating misalignment,” Proc. SPIE **1994**, pp. 90–101, 1994.
- [23] Oster G., Nishijima Y., “Moiré Patterns,” Sci. Am. **1994**, pp. 90–101, 1994.
- [24] Polhemus C., “Two-Wavelength Interferometry,” Appl. Opt. **208**, pp. 54–63, 1963.
- [25] Pratt W. K., *Digital Image Processing* (John Wiley and Sons 2da ed., 1991).
- [26] Rayces J. L., “Exact Relation Between Wave Aberration and Ray Abberation,” Opt. Acta **11**, pp. 85–88, 1964.
- [27] Ribbens W. B., “Surface Roughness Measurement by Two Wavelength Holographic Interferometry,” Appl. Opt. **13**(5), pp. 1085–1088, 1974.

- [28] Russ J. C., *The Image Processing Handbook* (CRC PRESS, 4ta ed., 2002).
- [29] Salinas L. J., Granados A. F., et. al., “Ronchi test with variable-frequency rulings,” *Opt. Eng.* **48**(1), 2009.
- [30] Wyant J. C., “Testing Aspherics Using Two-Wavelength Holography,” *Appl. Opt.* **10**(9), pp. 2113–2118, 1971.
- [31] Wyant J. C., Oreb B. F., and Hariharan P., “Testing aspherics using two-wavelength holography: use of digital electronic techniques,” *Appl. Opt.* **23**(22), pp. 4020–4023, 1984.
- [32] Zelenka J. S., Varner J. R., “Multiple-Index Holographic Contouring,” *Appl. Opt.* **8**(7), pp. 1431–1434, 1969.
- [33] <http://www.steren.com.mx/catalogo/prod.asp?f=0&sf=77&c=739&p=705&desc=led-ultrabrillante-de-5-mm--color-blanco>