



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA
DE LA MIXTECA

Procesamiento digital de interferogramas de fizeau

Tesis para obtener el título de ingeniero en computación

Presentada por

Juan José Matus Cabrera

Asesor

Dr. Agustín Santiago Alvarado

Huajuapán de León, diciembre de 2001

AGRADECIMIENTOS.

Al Dr. Agustín Santiago Alvarado por la sugerencia y dirección del tema de esta tesis, por sus valiosos consejos que en todo momento me brindó, mi más sincero agradecimiento.

A la UTM por permitirme terminar mis estudios y por el apoyo brindado en el desarrollo de la tesis, mi más profundo agradecimiento.

A mis amigos por sus consejos y apoyo durante mi carrera y durante el desarrollo de la tesis, mi agradecimiento.

A mis tíos les agradezco su apoyo y consejos brindados durante mi carrera y desarrollo de la tesis.

A mis hermanos mi agradecimiento, por el apoyo incondicional brindado.

Finalmente mi sincero, y más profundo agradecimiento a mi padre Macedonio y mi madre Elvia por su apoyo, paciencia y estímulos, sin los cuales difícilmente habría terminado.

U T W.12103

OBJETIVO

El objetivo de esta tesis es realizar un algoritmo de computó para encontrar la separación de las franjas de interferencia para poder conocer el radio de curvatura tangencial y la constante de conicidad de la superficie cónica convexa.

Para ello primero se obtienen los interferogramas a partir del montaje de un interferómetro de Fizeau, posteriormente se capturan los interferogramas para ser analizados digitalmente, suavizando los bordes de las franjas. Finalmente se implementará un algoritmo de computó que realice la tarea de obtener la posición del centro del patrón de interferencia, y por tres métodos distintos conocer la separación de las franjas de manera automática. Con estos valores se podrá conocer el radio de curvatura tangencial y la constante de conicidad de la superficie bajo prueba.

JUSTIFICACIÓN

Las técnicas interferométricas permiten conocer la forma de superficies con preescisiones del orden de décimas de milímetros, pero el éxito de estas técnicas radica, en poder medir con gran preescisión la separación de las franjas de interferencia, que en muchas ocasiones resulta una tarea difícil de llevar a cabo, principalmente porque los bordes de las franjas de interferencia no están bien delimitados. Así que el contar con un algoritmo de computó que realice esta tarea permite la aplicación de la misma en un tiempo relativamente corto (del orden de segundos).

U. T. M. 12103

RESUMEN

En esta tesis se presenta la metodología para conocer el radio de curvatura tangencial y la constante de conicidad de superficies cónicas convexas mayores a 30 cm de diámetro y un número f menores a 0.8.

El método consiste en capturar de manera digital interferogramas de Fizeau con una cámara CCD y procesarlas, para obtener la separación de las franjas de manera automática.

El procesamiento de los interferogramas consiste en obtener la posición del centro del patrón de interferencia y a partir de este, conocer la separación de las franjas de interferencia.

Esto es debido a que en los interferogramas reales existe el problema de definir cual es el centro del patrón y cuales son los bordes u orillas de las franjas de interferencia, siendo en muchas ocasiones una tarea difícil de llevar a cabo.

En este trabajo se propone un método para conocer el centro de las franjas y tres técnicas para conocer la separación de las franjas, las cuales son: binarización, binarización por histograma y Ajuste de curvas por medio de SPLINS. Las cuales se evalúan para saber cual arroja mejores resultados, analizando los resultados que estas técnicas obtienen.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y POSIBLE SOLUCIÓN

De los diversos métodos de prueba ópticos que existen, muy pocos pueden aplicarse a superficies cónicas convexas mayores a 30 cm de diámetro y $f/0.4$ (como el caso de los espejos empleados en telescopios), debido a los problemas que surgen en el momento de su implementación, ya sea porque el costo de las componentes ópticas auxiliares resulta ser tan alto que imposibilita su aplicación ó porque algunas técnicas obtienen parámetros con preescisiones por debajo de las requeridas.

También existe un problema de análisis de imágenes (interferogramas) para poder obtener la constante de conicidad y el radio de curvatura, midiendo la separación de las franjas de manera horizontal (tangencial) de la irradiancia de interferogramas obtenidos.

Para realizar esta tarea proponemos un método sencillo, y barato comparado con los métodos tradicionales, el cual consiste en utilizar un interferómetro de Fizeau, para medir la constante de conicidad y el radio de curvatura de la zona bajo prueba, a partir de conocer la separación de las franjas respecto al origen del patrón de interferencia.

Para obtener las separaciones de las franjas, primero se necesita obtener el interferograma por medio de una cámara CCD y guardarla en el disco duro, estas imágenes deben ser en formato "bmp" debido a que es el formato más fácil de manipular.

Una vez obtenido el interferograma se propone un algoritmo de computó para realizar la digitalización del interferograma de tal manera que se obtenga el radio de curvatura y la constante de conicidad de superficie cónica. Esto es, que se obtenga la separación de las franjas de irradiancia. Esto se hará delimitando las franjas, para poder encontrar los centros de cada una de ellas y así obtener las separaciones de las franjas, para esto, se aplicarán tres técnicas (Binarización, Binarización por histograma y Ajuste de curvas) para obtener alisar los bordes de las franjas y así poder conocer la separación de las franjas.

La obtención de la separación de las franjas se realizara de manera automática.

Índice

Agradecimientos.	i
Dedicatoria.	ii
Objetivo.	iii
Justificación.	Iv
Resumen.	v
Planteamiento del problema y solución propuesta.	vi
Introducción	1
Capítulo 1 Interferómetro de Fizeau.	
1.1 Introducción.	3
1.2 Sistemas interferométricos.	4
1.3 Consideraciones generales.	5
1.4 Condiciones para la interferencia.	13
1.5 Interferómetros de división de frente de onda.	14
1.6 Interferómetros de división de amplitud.	17
1.7 Interferómetro de Fizeau.	18
1.8 Conclusiones.	21
Capítulo 2 Procesamiento Digital de Imágenes.	
2.1 Introducción.	22
2.2 Representación de una imagen digital en tono de grises.	23
2.3 Pasos fundamentales para el procesamiento digital de imágenes.	24
2.4 Elementos del procesamiento digital de imágenes.	26
2.5 Adquisición.	29
2.6 Histograma.	32
2.7 Conclusiones.	35

Capítulo 3 Implementación y captura de interferogramas de Fizeau.

3.1 Introducción.	36
3.2 Tarjeta de adquisición (Bandit).	36
3.3 Cámara CCD (XC-73).	37
3.4 Captura de interferogramas.	38
3.5 Interferogramas obtenidos.	38
3.6 Incertidumbre y radio de curvatura.	39
3.7 Análisis de errores.	41
3.8 Conclusiones.	42

Capítulo 4 Diseño e implementación del Software.

4.1 Introducción.	43
4.2 Análisis del sistema Dfizeau.	44
4.3 Diseño del sistema Dfizeau.	44
4.4 Descripción de los módulos y sus respectivo diagrama de estructura.	47
4.5 Restricciones del Software.	58
4.6 Conclusiones.	60

Capítulo 5 Pruebas.

5.1 Introducción.	61
5.2 Generalidades.	62
5.3 Binarización.	65
5.4 Binarización por histograma.	67
5.5 Ajuste.	69
5.6 Análisis de Datos.	71
5.7 Conclusiones.	74

Capítulo 6 Conclusiones.

76

Referencias.

80

Apéndice I. Listado del programa principal.

82

Apéndice II. Manual de usuario.

87

Introducción

Existen una variedad de dispositivos para producir interferencia, es decir, disponer de elementos ópticos donde la misma fuente de luz o dos fuentes relacionadas se emiten ondas que se superponen en algún lugar.

Para conocer la forma de una superficie, existen métodos que comparan las desviaciones de la superficie bajo prueba con respecto a una superficie patrón (conocida). Esto es posible al examinar los patrones de interferencia, que son producidos por la superposición de haces de luz provenientes de la superficie bajo prueba y de la superficie de referencia. El éxito de esta técnica radica en poder medir con gran precisión la separación de las franjas en el patrón de interferencia. Una manera es tomar una fotografía del patrón y analizar esta de manera manual; otra alternativa más eficiente es el procesamiento digital de imágenes.

En este trabajo se analiza la interferometría de Fizeau para conocer la forma de superficies cónicas convexas mayores a 30cm y números f menores a 0.8.

El contenido de la tesis fue estructurado de la siguiente manera. En el primer capítulo se habla de las bases de la interferencia, así como del interferómetro de Fizeau.

En el capítulo 2, se explicarán las bases del procesamiento digital de imágenes, así como los métodos utilizados para el desarrollo del sistema.

El capítulo 3, se mencionará como funcionan los dispositivos empleados para el desarrollo del sistema; es decir, se describen los programas que se implementaran para la captura de los interferogramas, así como las características de la cámara CCD. También se mostrará el desarrollo de la obtención de la formula de la constante de conicidad y radio de curvatura.

En el capítulo 4, se especificarán las herramientas utilizadas para el diseño del software, así como la descripción de cada módulo de programación.

En el capítulo 5 se especificarán los métodos de resolución utilizados, así como las pruebas hechas al sistema con sus respectivos datos arrojados.

Finalmente se muestran las conclusiones en el capítulo 6, las referencias y apendices.

Capítulo 1

INTERFERÓMETRO DE FIZEAU

1.1 Introducción

Los patrones de color que resplandecen sobre una mancha de aceite en el pavimento asfáltico mojado son el resultado de una de las manifestaciones más comunes del fenómeno de interferencia. En una escala macroscópica podríamos considerar el problema relacionado con la interacción de las ondulaciones tomadas en la superficie de agua de una tina. Nuestra experiencia diaria con este tipo de situación nos permite visualizar una distribución compleja de perturbaciones. Puede haber regiones en donde dos o más ondas se hayan superpuesto, anulándose mutuamente o incluso completamente. Más aún, otras regiones podrían existir en el patrón, donde los valles o crestas resultantes fueran más pronunciados que los de cualquiera de las ondas constitutivas. Después de superponerse, las ondas individuales se separan y continúan completamente inafectadas por su encuentro previo.

Por medio de la interferencia se puede conocer la forma de las superficies, su composición (tipo de material) y sus propiedades de propagación. En este capítulo se mencionará como aplicar la interferometría para conocer la forma de superficies.

1.2 Sistemas interferométricos.

La interferencia óptica es la interacción de dos o más ondas de luz que produce una irradiancia resultante, la cual se desvía de la suma de la irradiancia de las ondas componentes [1].

Dentro de la multitud de sistemas ópticos que producen interferencia, estos se pueden clasificar en dos grupos:

- *División del Frente de Onda:* Utiliza porciones del frente de onda primario, bien sea directamente como fuente para emitir ondas secundarias o conjuntamente con sistemas ópticos para producir fuentes virtuales de ondas secundarias. Estas ondas secundarias, entonces se hace que se encuentren para interferir (ver figura 1.1).

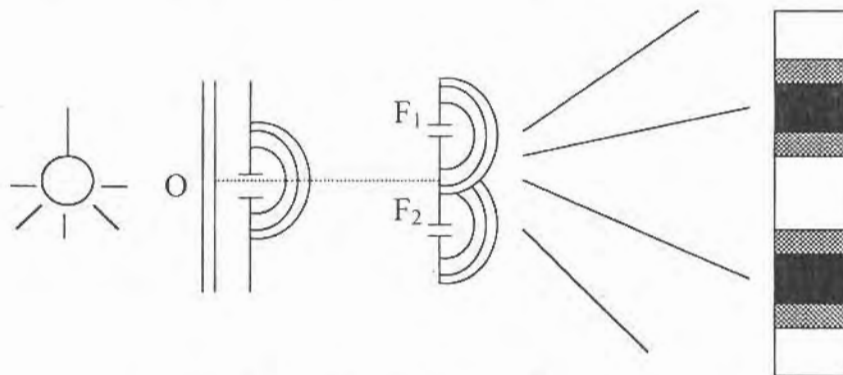


Figura 1.1. División del frente de onda

- *División de Amplitud:* La onda primaria es dividida en 2 segmentos, los cuales viajan por diferentes caminos, antes de recombinarse e interferir (ver figura 1.2).

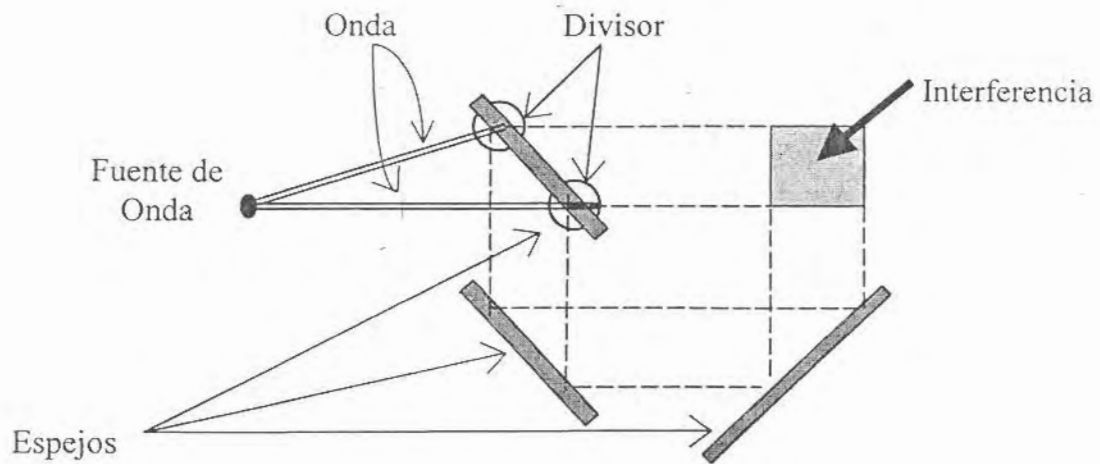


Figura 1.2. División de amplitud.

1.3 Consideraciones generales

En este apartado se deducen las ecuaciones básicas dentro del contexto escalar, para describir el fenómeno de la interferencia de la luz.

De acuerdo al principio de superposición la intensidad del campo eléctrico \mathbf{E} en un punto en el espacio, que proviene de los campos separados $\mathbf{E}_1, \mathbf{E}_2, \dots$, de varias fuentes que contribuyen, está dada por:

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2 + \dots \quad (1.1)$$

Donde \mathbf{E} es el campo resultante en ese punto, para el caso de la región visible \mathbf{E} varía en un tiempo sumamente rápido, aproximadamente 4.3×10^{14} a 7.5×10^{14} Hz. [2], haciendo que \mathbf{E} sea prácticamente indetectable debido a que no hay detectores que midan el campo con

esa velocidad. Por otro lado la irradiancia puede ser medida directamente y así es como atacaremos el problema de la interferencia.

Consideremos 2 fuentes puntuales S_1 y S_2 emitiendo ondas monocromáticas de la misma frecuencia en un medio homogéneo y que su separación a sea mucho más grande que λ . Coloquemos el punto de observación P lo suficientemente lejos de las fuentes de tal forma que los frentes de onda en P sean planos (Figura 1.3).

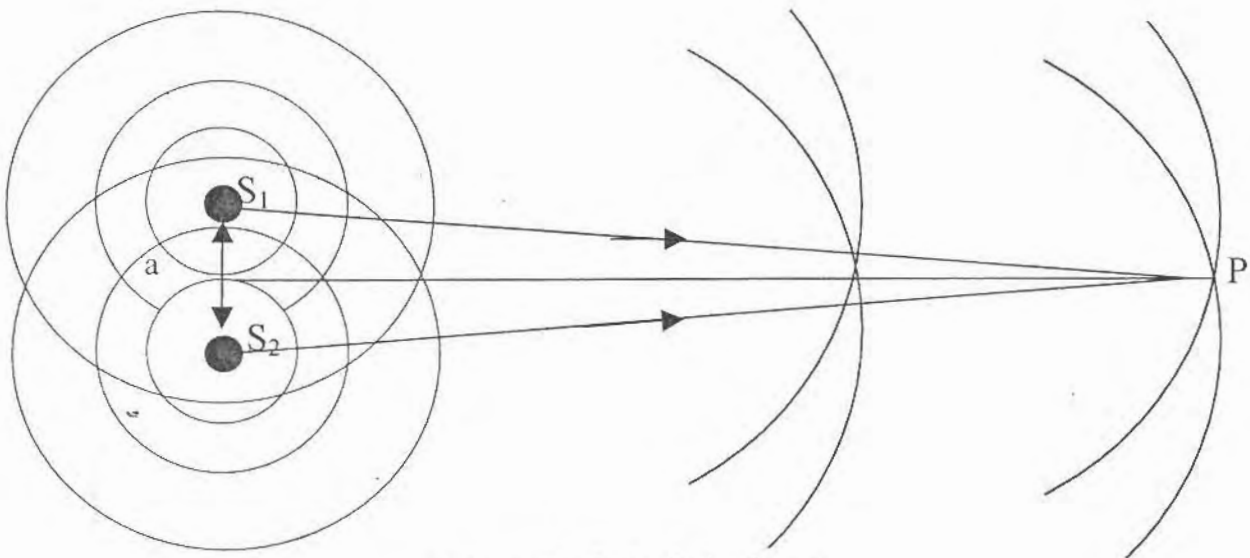


Figura 1.3. Ondas de dos fuentes

Al considerar ondas planas y linealmente polarizadas de la forma

$$\mathbf{E}_1(r, t) = \mathbf{E}_{01} \cos(\bar{k}_1 \cdot \bar{r} - \omega t + \varepsilon_1) \quad , \quad (1.2)$$

y

$$\mathbf{E}_2(r, t) = E_{02} \cos(\bar{k}_2 \cdot \bar{r} - \omega t + \varepsilon_2) , \quad (1.3)$$

La irradiancia en el punto \mathbf{P} esta dada por [24]:

$$I = \epsilon \nu \langle \mathbf{E}^2 \rangle = \langle \mathbf{E}^2 \rangle , \quad (1.4)$$

ya que $\langle \mathbf{E}^2 \rangle$ es el factor que nos brinda toda la información, mientras que el resto es una constante, consideremos solamente a $\langle \mathbf{E}^2 \rangle$.

Por consiguiente:

$$\mathbf{E}^2 = \mathbf{E} \cdot \mathbf{E} , \quad (1.5)$$

donde

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2 , \quad (1.6)$$

por lo tanto

$$\langle \mathbf{E}^2 \rangle = \langle \mathbf{E}_1^2 + \mathbf{E}_2^2 + 2\mathbf{E}_1 \mathbf{E}_2 \rangle = \langle \mathbf{E}_1^2 \rangle + \langle \mathbf{E}_2^2 \rangle + 2\langle \mathbf{E}_1 * \mathbf{E}_2 \rangle ; \quad (1.7)$$

de esta ecuación sacamos la siguiente relación con respecto a la irradiancia.

$$I = I_1 + I_2 + I_{12} , \quad (1.8)$$

donde

$$I_1 = \langle \mathbf{E}_1^2 \rangle , \quad (1.9)$$

$$I_2 = \langle \mathbf{E}_2^2 \rangle , \quad (1.10)$$

$$I_{12} = 2\langle \mathbf{E}_1 \cdot \mathbf{E}_2 \rangle , \quad (1.11)$$

Donde $2\langle \mathbf{E}_1 \cdot \mathbf{E}_2 \rangle$ es el término de interferencia.

Evaluemos el término de inferencia

$$\mathbf{E}_1 \cdot \mathbf{E}_2 = E_{01} \cdot E_{02} \cos(\bar{\mathbf{k}}_1 \cdot \bar{\mathbf{r}} + \varepsilon_1 - \omega t) * \cos(\bar{\mathbf{k}}_2 \cdot \bar{\mathbf{r}} + \varepsilon_2 - \omega t). \quad (1.12)$$

Esto es equivalente a:

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_1 \cdot \mathbf{E}_2 = E_{01} \cdot E_{02} & [\cos(\bar{\mathbf{k}}_1 \cdot \bar{\mathbf{r}} + \varepsilon_1) * \cos(\omega t) + \text{sen}(\bar{\mathbf{k}}_1 \cdot \bar{\mathbf{r}} + \varepsilon_1) * \text{sen}(\omega t)] \\ & * [\cos(\bar{\mathbf{k}}_2 \cdot \bar{\mathbf{r}} + \varepsilon_2) * \cos(\omega t) + \text{sen}(\bar{\mathbf{k}}_2 \cdot \bar{\mathbf{r}} + \varepsilon_2) * \text{sen}(\omega t)] \end{aligned} \quad (1.13)$$

Consideremos los promedios temporales de las siguientes funciones.

$$\langle \text{Cos}^2(\omega t) \rangle = \langle \text{Sen}^2(\omega t) \rangle = \frac{1}{2} , \quad (1.14)$$

$$\langle \text{Cos}(\omega t) * \text{Sen}(\omega t) \rangle = 0 . \quad (1.15)$$

Después de multiplicar y eliminar términos nos queda:

$$\langle \mathbf{E}_1 \cdot \mathbf{E}_2 \rangle = \frac{1}{2} E_{01} \cdot E_{02} \cos(\bar{\mathbf{k}}_1 \cdot \bar{\mathbf{r}} + \varepsilon_1 - \bar{\mathbf{k}}_2 \cdot \bar{\mathbf{r}} + \varepsilon_2); \quad (1.16)$$

por lo tanto

$$I_{12} = E_{01} \cdot E_{02} \text{Cos } \delta ; \quad (1.17)$$

donde

$$\delta = (\bar{\mathbf{k}}_1 - \bar{\mathbf{k}}_2) \cdot \bar{\mathbf{r}} + (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) , \quad (1.18)$$

Tomando:

$$I_1 = \langle E_1^2 \rangle = \frac{E_{01}^2}{2} \quad (1.19)$$

$$I_2 = \langle E_2^2 \rangle = \frac{E_{02}^2}{2} \quad (1.20)$$

El término de interferencia queda

$$I_{12} = 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \delta \quad (1.21)$$

Sustituyendo en la ecuación (1.8) queda:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \delta \quad (1.22)$$

En varios puntos en el espacio la irradiancia resultante puede ser mayor, menor o igual a $I_1 + I_2$ dependiendo del valor de I_{12} , es decir, dependiendo de δ . El valor máximo de la irradiancia se obtiene cuando $\cos \delta = 1$ tal que

$$I_{\max} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \quad (1.23)$$

cuando

$$\delta = 0, \pm 2\pi, \pm 4\pi \pm \dots \pm 2(k+2)\pi \quad (1.24)$$

con $k = 1, 2, 3, \dots$

En este caso de la diferencia de fase entre las dos ondas es un múltiplo entero de 2π , y las perturbaciones están en fase. Se habla de esto como interferencia constructiva total [3].

Si $0 < \text{Cos } \delta < 1$ entonces las ondas están fuera de fase, $I_1 + I_2 < I < I_{\text{max}}$ y el resultado se conoce como interferencia constructiva.

Para $0 > \text{Cos } \delta > -1$, se tiene la condición de interferencia destructiva, $I_1 + I_2 > I > I_{\text{min}}$. El valor mínimo de la irradiancia se da cuando $\text{Cos } \delta = -1$.

$$I_{\text{min}} = I_1 + I_2 - 2\sqrt{I_1 I_2} \quad , \quad (1.25)$$

cuando

$$\delta = \pm\pi, \pm 3\pi \pm 5\pi \dots \pm 2(k+3)\pi \quad (1.26)$$

con $k = 1, 2, 3, \dots$

En este caso se dice que existe una interferencia destructiva total. Cuando $\delta = \pi/2$, se obtiene que $I = I_1 + I_2$, por lo tanto no existe interferencia.

Un caso que también debe ser tomado en cuenta es cuando las amplitudes de las ondas que llegan al punto P de la Figura (1.3) son iguales, es decir $E_{01} = E_{02}$. Esto nos lleva a decir que las contribuciones a la irradiancia de ambas fuentes son entonces iguales. Sea $I_1 = I_2 = I_0$. la ecuación (1.22) ahora queda:

$$I = 2I_0(1 + \text{Cos } \delta) = 4I_0 \text{Cos}^2 \frac{\delta}{2} \quad (1.27)$$

La ecuación (1.22) también es valida para las ondas esféricas emitidas por S_1 y S_2 . Estas ondas se pueden expresar como

$$E_1(r_1, t) = E_{01}(r_1) e^{i(k \cdot r_1 - \omega t + \varepsilon_1)} \quad , \quad (1.28)$$

y

$$E_2(r_2, t) = E_{02}(r_2) e^{i(k \cdot r_2 - \omega t + \varepsilon_2)} \quad , \quad (1.29)$$

r_1 y r_2 son los radios de los frentes de onda esféricos que se superponen en P, y para este caso

$$\delta = k(r_1 - r_2) + \varepsilon_1 - \varepsilon_2 \quad . \quad (1.30)$$

La ecuación (1.27) se podrá aplicar cuando la separación entre S_1 y S_2 sea pequeña en comparación con r_1 y r_2 y cuando, la región de interferencia sea pequeña en el mismo sentido. Bajo estas circunstancias E_{01} y E_{02} pueden considerarse independientes de la posición, es decir constantes en la pequeña región examinada. Si $E_{01} = E_{02}$ y $I_1 = I_2 = I_0$ y tenemos que

$$I = 4I_0 \text{Cos}^2 \frac{1}{2} [k(r_1 - r_2) + (\varepsilon_1 - \varepsilon_2)] \quad . \quad (1.31)$$

Los máximos de irradiancia ocurren cuando

$$\delta = 2\pi m \quad , \quad (1.32)$$

Siempre que $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$, así mismo los mínimos para los cuales $I = 0$, se muestran cuando

$$\delta = \pi(2m + 1) \quad . \quad (1.32)$$

Por lo anterior la irradiancia máxima ocurre cuando

$$(r_1 - r_2) = [2\pi m + (\varepsilon_2 - \varepsilon_1)] / k \quad , \quad (1.33a)$$

Y la mínima cuando

$$(r_1 - r_2) = [\pi(2m + 1) + (\varepsilon_2 - \varepsilon_1)] / k \quad . \quad (1.33b)$$

Estas ecuaciones definen una familia de superficies, cada una de las cuales es un hiperboloide de revolución. Los vértices de los hiperboloides están separados por distancias iguales a los lados derechos de las ecuaciones (1.34). Los focos están localizados en S_1 y S_2 . Si las ondas están en fase al salir del emisor $\varepsilon_1 - \varepsilon_2 = 0$, las ecuaciones (1.34) se reducen a:

$$(r_1 - r_2) = 2\pi m / k = m\lambda \quad , \quad (1.35a)$$

para irradiancia máxima y

$$(r_1 - r_2) = \pi(2m + 1) / k = (m + \frac{1}{2})\lambda \quad , \quad (1.35b)$$

para la irradiancia mínima .

Las zonas claras y oscuras que se verían en una pantalla colocada en la región de interferencia se conocen como **franjas de interferencia**.

1.4 Condiciones para la interferencia.

Para observar el patrón de interferencia, debe cumplirse lo siguiente [4]:

1. Que $\varepsilon_1 - \varepsilon_2 = C$ nstante en el tiempo.
2. Las fuentes deben de ser coherentes ó producidas por una sóla fuente (monocromatica).

Los patrones de interferencia serán más claros si se cumple que las amplitudes de las ondas sean iguales con respecto a la polarización de la luz. ($\epsilon_{01}=\epsilon_{02}$) [5].

Además se deben cumplir las leyes de Fresnel y Arago [7], que dicen:

- a) Dos estados de polarización lineal coherentes y ortogonales no pueden interferir en el sentido de que $I_{12} = 0$ y resulten franjas.
- b) Dos estados de polarización lineal coherentes y paralelos interfieren de la misma forma que la luz natural.
- c) Dos estados con polarización lineal opuestos constitutivos de la luz natural no pueden interferir para formar un patrón de interferencia.

1.5 Interferómetros de división de frente de onda.

Consideremos una onda plana monocromática hipotética iluminando una rendija larga y angosta (Figura 1.4). De esta rendija emergerá una onda cilíndrica, la cual cae a su vez en 2 rendijas S_1 y S_2 que son angostas y paralelas y se encuentran muy cercanas unas de otras. Si existe simetría, las ondas S_1 y S_2 estarán en fase, por lo que al recorrer una cierta distancia y superponerse en alguna región del espacio, existirá interferencia [7].

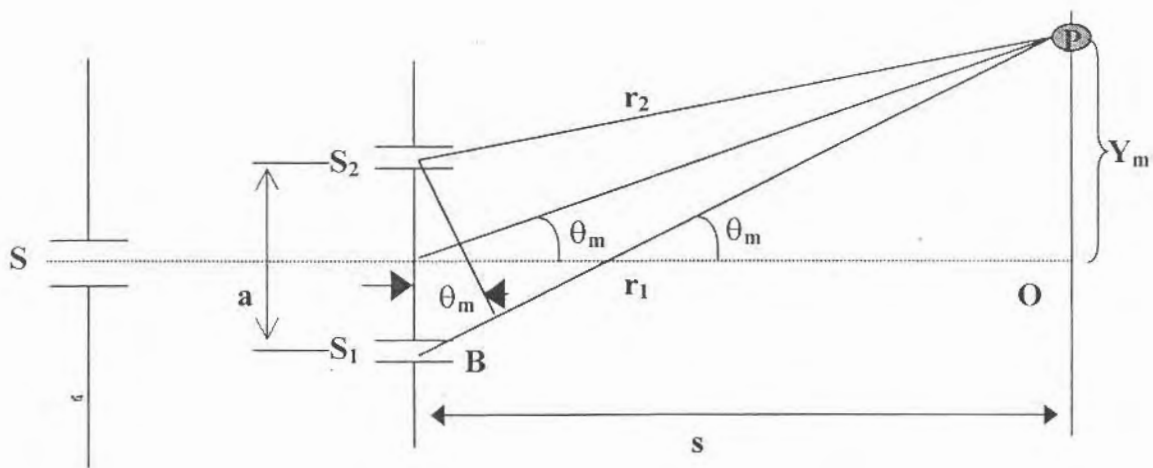


Figura 1.4. División de frente de onda

De la Figura (1.4) podemos ver que la diferencia de fase se debe a una diferencia de camino óptico (DCO) entre los rayos provenientes de s_1 y s_2 y que viajan a lo largo de S_1P y S_2P .

$$DCO = \overline{S_1P} - \overline{S_2P} = \overline{S_1B} \quad , \quad (1.36)$$

$$\overline{S_1 B} = r_1 - r_2 \quad (1.37)$$

Donde r_1 y r_2 se pueden expresar de la siguiente manera

$$r_1 - r_2 = a\theta \quad (1.38)$$

$$\theta = \frac{y}{s} \quad (1.39)$$

Por lo tanto

$$r_1 - r_2 = \frac{a}{s} y \quad (1.40)$$

Sabemos que

$$r_1 - r_2 = m\lambda \quad (1.35a)$$

Por lo tanto obtenemos que

$$y_m = \frac{s}{a} m\lambda \quad (1.41)$$

Esto da la posición de la m -ésima franja brillante sobre la pantalla si contamos el máximo en 0 como la franja cero. La posición angular de la franja se obtiene sustituyendo en la ecuación (1.39) la ecuación (1.41); así

$$\theta_m = \frac{m\lambda}{a} \quad (1.42)$$

El espacio entre las franjas se puede calcular a partir de la ecuación (1.41).

La diferencia en las posiciones de dos máximos consecutivos es

$$y_{m+1} - y_m = \frac{s}{a}(m+1)\lambda - \frac{s}{a}\lambda \quad , \quad (1.43)$$

así

$$\Delta y = \frac{s}{a}\lambda \quad . \quad (1.44)$$

Ya que el patrón es equivalente al obtenido para dos ondas esféricas superpuestas (al menos en la región $r_1 \approx r_2$), podemos usar la ecuación (1.27). Usando la diferencia de fase

$$\delta = k(r_1 - r_2) \quad . \quad (1.45)$$

La ecuación (1.27) se puede describir como

$$I = 4I_0 \cos^2 \frac{k(r_1 - r_2)}{2} \quad , \quad (1.46)$$

siempre que, los dos haces sean coherentes y tengan irradiancia igual a I_0 (ver figura 1.5).

Con

$$r_1 - r_2 = y \frac{a}{s} \quad , \quad (1.47)$$

la irradiancia resultante queda

$$I = 4I_0 \cos^2 \frac{ya\pi}{s\lambda} \quad . \quad (1.48)$$

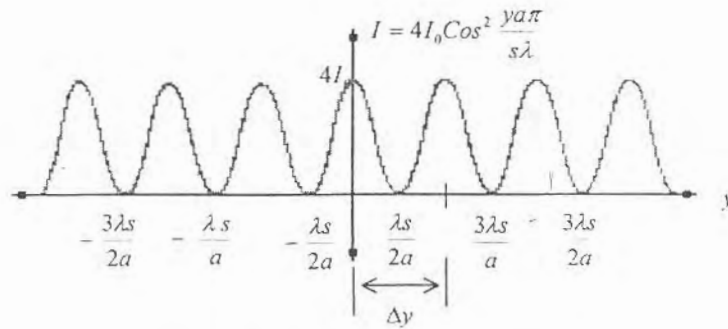


Figura 1.5. Irradiancia contra distancia [8]

1.6 Interferómetros de división de amplitud.

Si dos ondas producidas por división de amplitud son reunidas de alguna manera sobre un detector, habrá interferencia en tanto que la coherencia original entre las dos ondas no haya sido afectada. Si los caminos ópticos difieren por una distancia mayor que un tren de onda, las porciones unidas en el detector corresponderán a diferentes trenes de onda [9]. Por lo tanto no existirá una relación de fase única entre ellas, en cuyo caso el patrón de franjas será inestable hasta tal punto que no será posible observarlo.

Existe un gran número de Interferómetros de división de amplitud. Uno de los más conocidos es el interferómetro de Michelson (ver figura 1.6).

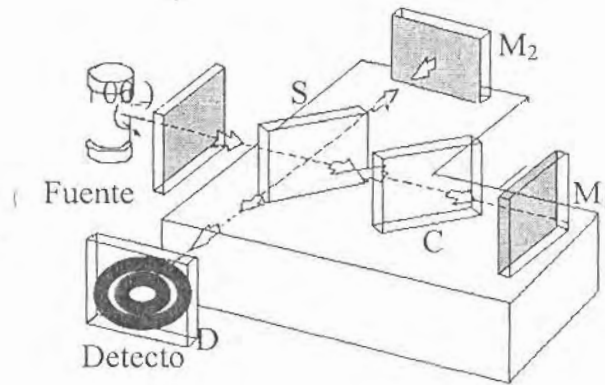


Figura 1.6. Interferómetro de Michelson.

Una fuente extensa (la cual puede ser, por ejemplo, una placa difusora de vidrio esmerilado iluminada por una lámpara de descarga) emite una onda, parte de la cual viaja a la derecha. El divisor de haz O divide la onda en dos, una viajando a la derecha y otra hacia arriba al fondo. Las dos ondas serán reflejadas por los espejos M_1 y M_2 y regresadas al divisor de haz. Parte de la onda que viene de M_2 pasa a través del divisor de haz hacia abajo y parte de la onda proveniente de M_1 es desviada por el divisor de haz hacia el detector. Por lo tanto las ondas se unen y es posible que se produzca interferencia.

1.7 Interferómetro de Fizeau.

Un interferómetro de Fizeau es un sistema auto colimadora (fuente de luz localizada en el punto focal de la lente sobre el eje), que consta de: lente colimadora, superficie de referencia, diafragma de abertura y la superficie bajo prueba (superficie cónica convexa), Figura (1.8).

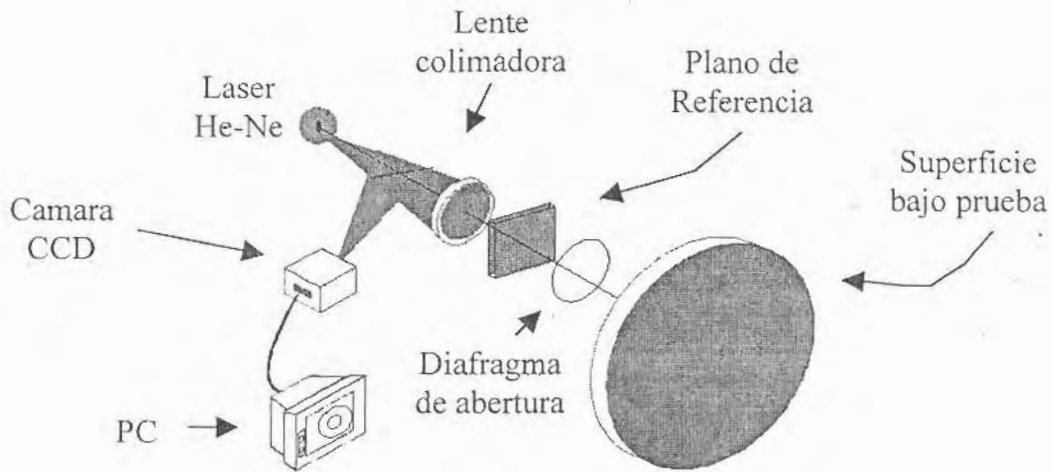


Figura 1.7. Diagrama del montaje real del Interferómetro de Fizeau.

Este sistema forma un patrón de interferencia debido a la superposición de los haces reflejados, en el plano de referencia y en la superficie bajo prueba.

Para observar el patrón de interferencia se introduce un divisor de haz, el cual desvía los rayos del arreglo; un esquema de dicho instrumento se muestra en la Figura (1.7).

La superficie de referencia en un interferómetro de Fizeau generalmente suele ser un plano óptico o una superficie curva, el plano óptico se utiliza para probar superficies planas y la superficie esférica se utiliza para probar superficies esféricas o asféricas, donde el radio de curvatura de la superficie de referencia es muy parecido al de la superficie bajo prueba.

En el interferómetro de Fizeau (Figura 1.8) las franjas son del tipo de igual de grueso, con las reflexiones en ambas caras de la placa P. La lente tiene doble propósito de

colimar la luz de la fuente puntual y de concentrar la luz que regresa al ojo, con el fin de permitir la observación de todo el patrón de interferencia.

La diferencia de camino óptico (DCO) esta dada como [25]:

$$DCO = 2nd \quad , \quad (1.47)$$

Donde d es el grueso de la placa y n es su índice de refracción. El campo del interferómetro está libre de franjas si el producto nd es constante, pero si suponemos que el índice de refracción es homogéneo entonces cualquier franja se puede atribuir únicamente a variaciones en el grueso.

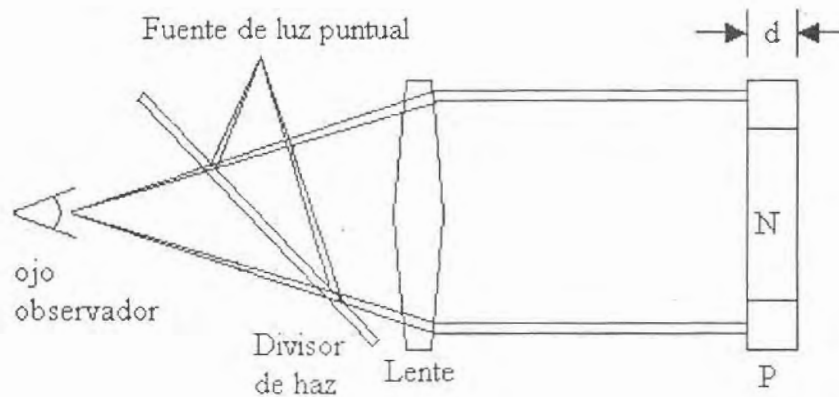


Figura 1.8. Diagrama del Interferómetro de FIZEAU.

1.8 Conclusiones

La interferencia permite conocer la forma, material y funcionamiento de instrumentos o superficies con gran precisión del orden de la longitud de onda (λ). Esto es debido a que se puede medir las diferencias del orden de λ o el patrón de interferencia.

Como se observa el interferómetro de Fizeau es uno de los interferómetros más sencillo, y barato comparado con los diversos interferómetros que contienen un número mayor de componentes ópticos.

Capítulo 2

PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES.

2.1 Introducción.

El procesamiento digital de imágenes es una herramienta muy útil en nuestros días para la solución de problemas visuales. La importancia de los métodos en el procesamiento digital de imágenes descansa dentro de dos principales áreas de aplicación: El mejoramiento de información pictorial para la interpretación humana, y procesamiento de datos en escena para la percepción de máquinas automátatas. Uno de los principales objetivos del procesamiento de imágenes es que el resultado obtenido sea más apropiado que la imagen original para aplicaciones específicas.

Las bases del proceso de imágenes son muy simples, sin embargo, existen aplicaciones mucho más complejas, las cuales tendrían que ser estudiadas a fondo para poder obtener los resultados apropiados.

En este capítulo se explicará como se aplica esta técnica, para el reconocimiento y procesamiento de patrones de interferencia.

2.2 Representación de una imagen digital en tono de grises.

El término imagen monocromática o imagen simple, se refiere a una función de intensidad de luz de dos dimensiones $f(x, y)$, donde 'x' y 'y' denotan coordenadas espaciales y el valor de f en cualquier punto (x, y) es proporcional al brillo (o escala de grises) de la imagen en ese punto [26], ver figura 2.1.

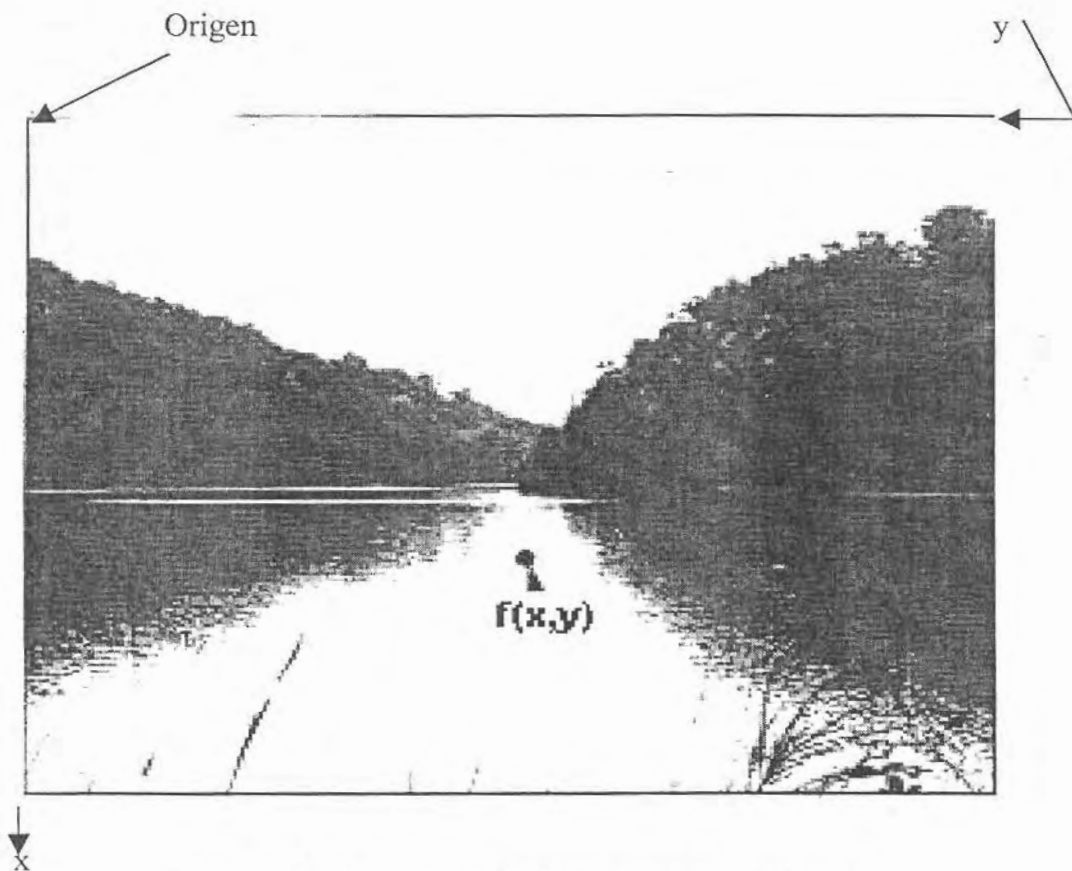


Figura. 2.1. Representación de una imagen en tono de grises

Una imagen digital podría considerarse como una matriz donde sus índices de columnas y renglones indican un punto dentro de la imagen y el correspondiente valor del elemento de la matriz identifica el valor de gris en ese punto. Los elementos del arreglo digital son

llamados *elementos de la imagen, elementos de la foto, pixeles o pels (Picture elements)*. El tamaño de la imagen varia de acuerdo a la aplicación.

2.3 Pasos Fundamentales para el procesamiento digital de imágenes.

El procesamiento digital de imágenes encapsula un gran número de integrante: Hardware, Software, y solvencia teórica. Los diferentes pasos para llevar a cabo la digitalización se muestran en la figura 2.2.

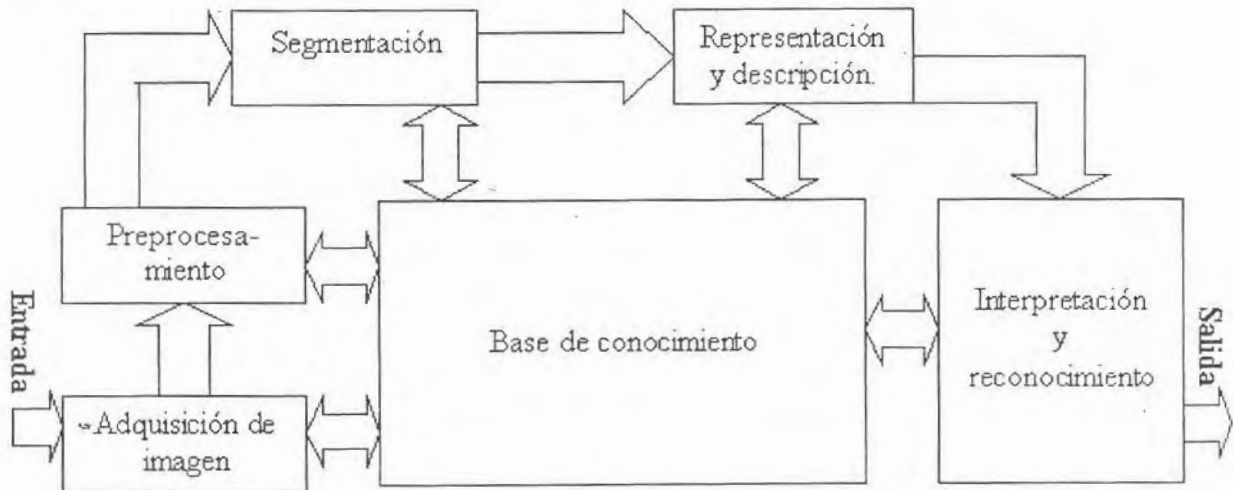


Figura 2.2. Pasos fundamentales del procesamiento digital de imágenes.

El primer paso es la adquisición de la imagen para ello es necesario un sensor de imágenes y la capacidad de digitalizar producida por el sensor. El sensor puede ser una cámara monocromática o a color.

El siguiente paso es el preprocesamiento: Consiste en proporcionar a la imagen los elementos necesarios para los siguientes procesos. Algunas de sus funciones son ajustar el contraste, eliminar el ruido, etc.

El siguiente paso es la segmentación, divide la entrada de una imagen en sus partes constitutivas u objetos. Los objetos o partes constitutivas de la imagen es cada pixel con su respectivas coordenadas y su intensidad.

En términos de reconocimiento, la función de la segmentación es extraer individualmente caracteres y palabras del fondo. La salida de la segmentación usualmente son los datos de los pixeles sin procesar, constituyendo los linderos de una región o todos los puntos de la región tratada, también convierte los datos en información apropiada para la computadora.

La representación solo es una parte de la solución para la transformación de los datos dentro de una forma apropiada para el proceso siguiente de la computadora. La descripción, también llamada selección a caracterizar (feature selection), son arreglos de aspectos extraídos que resultan en alguna información cuantitativa de interés o aspectos que son básicos para la diferenciación de una clase de objetos y otra.

El reconocimiento es el proceso que asigna una etiqueta a un objeto sobre la información proporcionada por sus descriptores. La interpretación envuelve significados asignados al conjunto de objetos reconocidos.

2.4 Elementos del procesamiento digital de imágenes.

Los elementos del procesamiento digital de imágenes son: adquisición, almacenamiento, procesamiento, comunicación, y visualización; (Figura 2.3) [12].

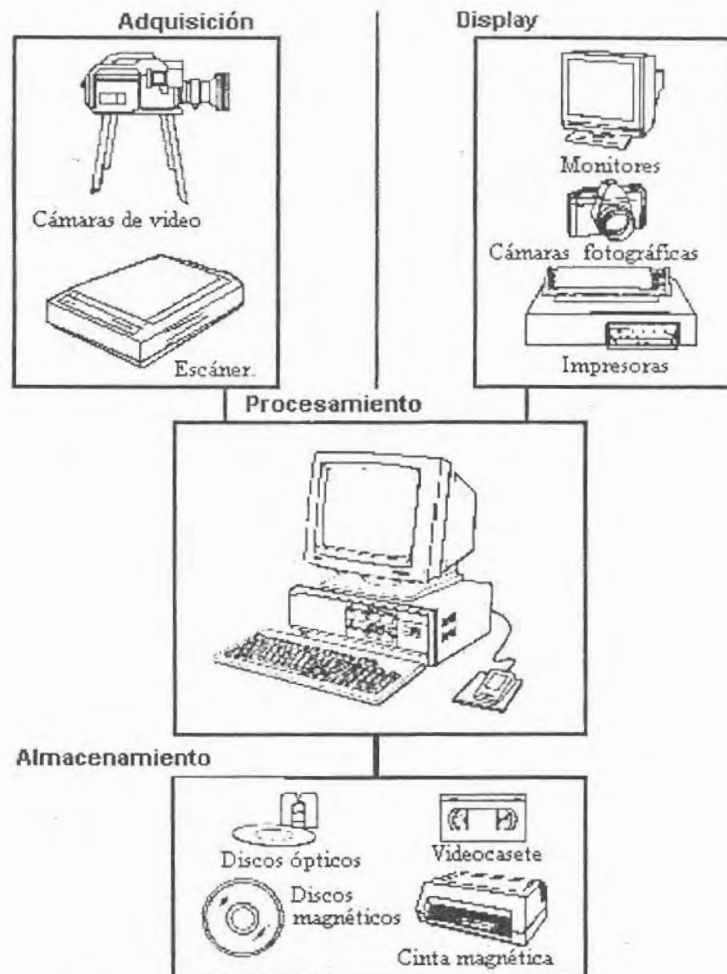


Figura 2.3. Dispositivos del procesamiento digital de imágenes.

- **Adquisición.** Dos elementos son necesarios para la adquisición de imágenes. El primero es un dispositivo físico que sea sensible a las bandas del espectro electromagnético (como los rayos X, ultravioleta, o bandas infrarrojas) y produzca señales eléctricas de salida, proporcional al nivel de energía censado.

El segundo llamado digitalizador, es un dispositivo capaz de convertir la salida eléctrica del dispositivo físico en una forma digital [12].

Los dispositivos más frecuentemente usados para la adquisición de imágenes son los micro-densitómetros, disectores de imágenes, cámaras vidicom, y arreglos fotosensitivos de estado sólido. Las cámaras CCD (charge-coupled device) entran dentro de los dispositivos de adquisición (arreglos fotosensitivos de estado sólido). En la sección 2.5 se verán con más detalle.

- **Almacenamiento.** El almacenamiento de las aplicaciones de procesamiento de imágenes cae en tres principales categorías [13].

a) El almacenamiento a corto plazo que se usa durante el procesamiento.

Un método usado para esta categoría es la memoria del computador, otro es por medio de tarjetas especiales (frame buffers), que almacenan una o más imágenes y pueden ser accesadas rápidamente .

b) Almacenamiento en curso o en línea se usa para una llamada relativamente rápida. Generalmente es hecha por cintas magnéticas. Actualmente es llamado almacenamiento óptico-magneto (MO), usando un láser y tecnologías especializadas de materiales logrando cerca de 1Gb de almacenamiento en platos ópticos de entrada de $5^{1/4}$.

c) Almacenamiento en archivo, caracterizada por acceso no muy frecuente. Se caracteriza para requerimientos de almacenamiento masivo, pero infrecuentemente necesitado para su acceso.

- **Procesamiento.** El procesamiento digital de imágenes envuelve procedimientos que usualmente son expresados en forma algorítmica. Así, a excepción de la adquisición y el despliegue, la mayoría de las funciones del procesamiento de imágenes puede ser implementada en software [14].

La única razón del uso de hardware especializado en el procesamiento de imágenes es por la necesidad de velocidad en algunas aplicaciones o para cubrir algunas de las limitaciones fundamentales de las computadoras.

- **Comunicación.** Envuelve primordialmente la comunicación local entre los sistemas de procesamiento de imágenes y la comunicación remota de un punto a otro, típicamente en la conexión con la transmisión de los datos de la imagen. El hardware y software para comunicaciones locales son disponibles en la mayoría de las computadoras [15].
- **Visualización.** Los monitores blanco y negro, y de color son los principales dispositivos de visualización usados para el procesamiento de imágenes [16].

2.5 Adquisición.

Como se menciona en la sección 2.3 la adquisición es uno de los elementos de los sistemas de procesamiento de imágenes, los dispositivos de adquisición son diversos es por eso que se deben tratar con mayor detalle.

Como un ejemplo, considere los fundamentos de sistemas básicos de rayos x. La salida de una fuente de rayos x es dirigida a un objeto y un medio sensible a los rayos X es puesto sobre el otro lado del objeto. El medio adquiere una imagen de materiales (como los huesos y tejido) así teniendo varios grados de absorción de rayos X. El propio medio puede ser un filme, una cámara de televisión combinada con un convertidor de rayos X de fotones, o detectores discretos cuyas salidas son combinadas para reconstruir la imagen digital.

Otra función importante del sensor es mantener un arreglo de una luz infrarroja y visible. Entre la mayoría de los dispositivos frecuentemente usados para este propósito están los microdensitómetros, disectores de imagen, cámaras vidicom, y los arreglos de estado sólido fotosensitivos. El primer dispositivo requiere que la imagen al ser digitalizada este en forma de una transparencia (como un filme negativo) o fotografía. Las cámaras Vidicon y los arreglos de estado sólido fotosensitivos pueden aceptar imágenes grabadas de esta manera, y ellos también pueden digitalizar imágenes naturales que tienen la suficiente intensidad de luz para excitar el detector.

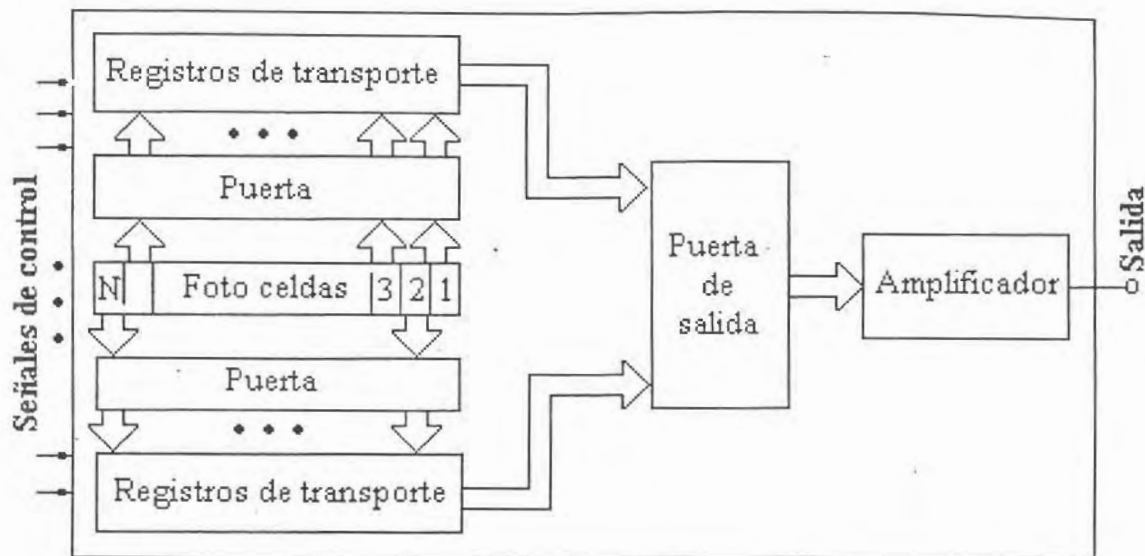


Figura 2.4. CCD, sensor de escáneo en línea.

Los arreglos de estado sólido están compuestos de elementos discretos de silicón similares, llamados foto celdas (*Photosites*), que tienen un voltaje de salida proporcional a la intensidad de la luz incidente. Los arreglos de estado sólido están organizados en uno de los dos arreglos principales: sensores de escáneo lineal (line scan sensors) y sensores de área. Un sensor de escáneo lineal consiste en una fila de foto celdas que produce una imagen de dos dimensiones por medio del movimiento relativo entre la perspectiva y el detector. Por ejemplo, los sensores de escáneo lineal son usados extensivamente en escáneres de cama plana. Un sensor de área está compuesto por una matriz de foto celdas y es por consiguiente capaz de capturar una imagen de la misma manera como, digamos, un tubo Vidicom. Una ventaja significativa de los arreglos de estado sólido es que pueden ser disparadas a velocidades altas (digamos, 1/10,000 sec.). Esto los hace ideales para aplicaciones en el cual el movimiento libre esta presente.

La tecnología usada en sensores similares de estado sólido son basados principalmente en dispositivos de carga acoplados (CCDs). La figura (2.4) muestra un típico escáneo del sensor CCD en línea; contiene una fila de foto celdas (photosites), dos puertas de transferencia usadas para registrar el contenido dentro de los elementos , de esta manera llamados registros de transporte, y una puerta de salida para registrar el contenido dentro de los registros de transporte dentro de un amplificador. El amplificador saca una señal de voltaje proporcional al contenido de la fila de fotoceldas.

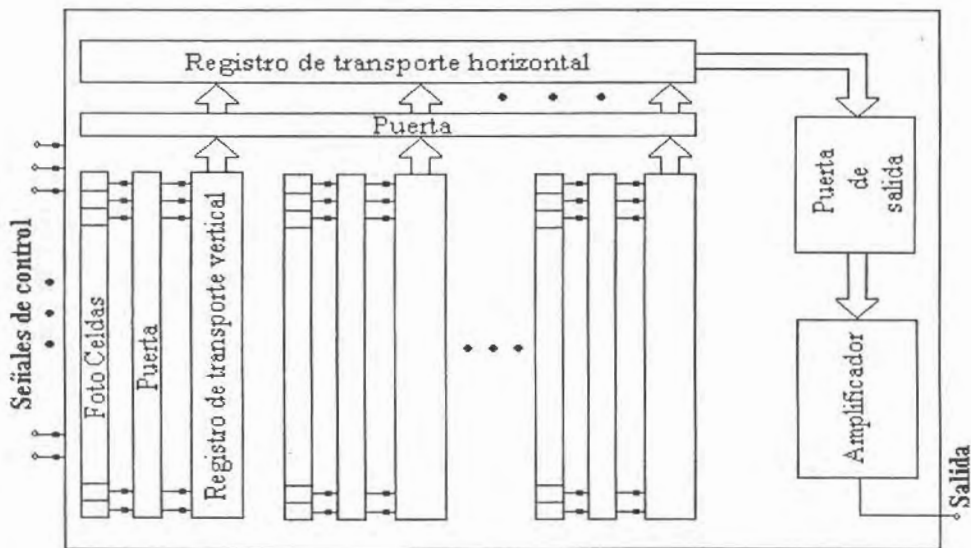


Figura 2.5. CCD, Sensor por área.

El área de los arreglos de carga acoplados, son similares a los sensores de exploración en línea, excepto que las foto celdas son organizadas en forma matricial y una combinación de puertas/registros de transporte separan columnas de fotoceldas, figura 2.5. Los contenidos de las foto celdas impares son esencialmente entradas dentro de los registros de transporte vertical y por lo tanto en los registros de transporte horizontal. El contenido de este registro es alimentado dentro de un amplificador cuya salida es una línea

de video. Repitiendo este procedimiento para los demás números completa las líneas del segundo campo de un marco de imagen de TV entrelazado completo. El escaneo es repetido a 30 veces por segundo[27].

2.6 Histogramas.

La modelación por medio de histogramas resulta una técnica muy poderosa en la mejora de la calidad de una imagen, en el contraste de las mismas y en el análisis de texturas. El principio básico consiste en aumentar el brillo de una imagen o mejorar el contraste de la misma, permitiendo de este modo destacar características presentes en la imagen las cuales no resultaban visibles previamente.

Se define el histograma de una imagen blanco y negro X como la frecuencia relativa de los niveles de gris presentes en la misma a través de la relación [17]

$$h_i = n_i / NM \quad (2.1)$$

siendo n_i la cantidad de ocurrencias del nivel de gris i en la imagen X cuya cantidad de pixeles es NM . Es decir, el histograma de una imagen da una idea de la distribución de grises presentes en la misma.

Ejemplo: Sea X, imagen de 16 niveles de gris, tabla 2.1.

Tabla 2.1. Matriz de niveles de gris

10	10	11	12
9	9	9	5
9	10	9	9
8	8	8	9

Entonces las frecuencias resultan ser

Tabla 2.2. Frecuencias de niveles de grises.

TONO DE GRISES	FRECUENCIA
0	0
1	0
2	0
3	0
4	0
5	1
6	0
7	0
8	3
9	7
10	3
11	1
12	1
13	0
14	0
15	0

Claramente se ve que la suma total de las frecuencias debe dar el tamaño de la imagen. Otra forma de representar las frecuencias es a través de las frecuencias relativas en lugar de las frecuencias absolutas. Las mismas resultan de la división de la frecuencia absoluta por la cantidad total de píxeles de la imagen. Por ejemplo, en el caso anterior la frecuencia relativa del valor de nivel de gris 8 es

$$h_8 = \frac{n_8}{16} \quad (2.2)$$

$$h_8 = 3/16 \quad (2.3)$$

$$h_8 = 0.1875 \quad (2.4)$$

Las técnicas utilizadas en la modelación de los mismos permiten modificar las características de la imagen a la cual pertenece dicho histograma. En general al calcular el histograma de cualquier imagen, esta suele tener una distribución de valores agrupados en algún intervalo del mismo como se muestra en la figura 2.4. En caso de transformar un histograma no uniforme en uno que sí lo sea se dice que se ha realizado una *ecualización* del mismo. Muchas veces esta técnica resulta útil para aumentar el brillo de la imagen que se está procesando permitiendo resaltar características que están presentes en la imagen y no resultaban visibles debido a la diferencia de contraste.

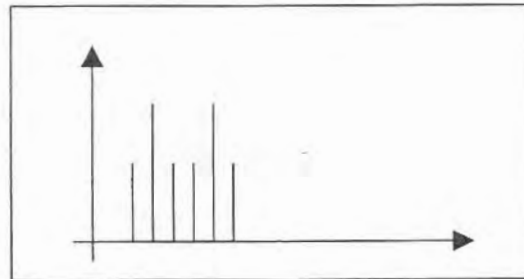


Figura 2.4. Distribución uniforme.

2.7 Conclusiones.

El principal propósito de este capítulo fue presentar los fundamentos teóricos del procesamiento digital de imágenes y describir los pasos fundamentales al procesar una imagen digital; los cuales son: adquisición de la imagen, preprocesamiento, segmentación, representación y descripción, reconocimiento e interpretación. Todos fueron discutidos en este capítulo.

También se presentaron los elementos necesarios en cuanto a hardware y software para realizar la adquisición, almacenamiento, procesamiento, comunicación y despliegue de las imágenes.

Finalmente se realizó una descripción de las cámaras CCD.

Capítulo 3

IMPLEMENTACIÓN Y CAPTURA DE INTERFEROGRAMAS DE FIZEAU.

3.1 Introducción

Los diversos programas y dispositivos para la captura de imágenes ayudan al desarrollo del procesamiento digital de imágenes, de tal manera que el procesamiento sea más fácil de realizarse. En la actualidad existen diferentes tipos de cámaras CCD capaces de obtener imágenes de alta calidad. La implementación del interferómetro de Fizeau nos ayudará a encontrar los radios de curvatura, así como la constante de conicidad de las superficies cónicas bajo prueba. El análisis y la prueba de errores del radio y la constante de conicidad nos muestran que incertidumbre tendrán los valores a la hora de hacer los cálculos.

3.2 Tarjeta de adquisición de video (Bandit).

Bandit es una tarjeta digitalizadora de video PCI (Peripheral Component Interconnect) e integrada con una tarjeta de alto funcionamiento VGA, capaz de desplegar video capturado en diferentes tamaños en el escritorio de Windows. La digitalización superior de la tarjeta

Bandit es maximizar la calidad del video cuando se capturan imágenes por cámaras a color o monocromáticas. La tarjeta Bandit esta dirigida a todas las aplicaciones que necesitan un funcionamiento excepcional VGA y de captura de video.

La tarjeta Bandit necesita un procesador mínimo Intel Pentium (el primer procesador con ese nombre) o un sistema compatible con una ranura PCI libre. Necesita windows 95 o windows NT 4.0 o superior. Las características de la resolución de la tarjeta bandit son con un máximo de 1600x1200 pixeles en color alto y 1280x1024 en color verdadero.

3.3 Cámara CCD (XC-73).

La cámara XC-73 es una cámara de módulos monocromática CCD . Tiene una gran calidad de imagen y varios modos de disparador, incluye un disparador asíncrono. Cuenta con una resolución de 768x494. Un disparador de 1/125 a 1/10000 sec. También cuenta con control externo de la velocidad del disparador, alta sensibilidad de 400 lux F4 (min 3 lux F1.4). Alto radio (>56 db), campo y marco de integración, función de reseteo.

La velocidad de un disparador normal puede seleccionarse entre 1/125 y 1/10 000 sec (7 pasos) o a modo titilante. La función del modo especial del disparador, es tener más control sobre la velocidad y el tiempo del disparador, la velocidad puede ser establecida libremente entre 1/77 y 1/500 000 sec. En el disparador asíncrono, el compás (timing)

puede ser logrado usando el modo del disparador especial y alimentando a la señal de activación de la cámara.

3.4 Captura de interferogramas.

La captura de interferogramas se dio mediante los siguientes pasos:

1. Se montó el interferómetro de fizeau (ver figura 3.1).
2. Se instaló la tarjeta de captura de imágenes y la cámara CCD.
3. Se instaló el programa BanditPro.
4. Se pusieron las superficies cónicas bajo prueba.

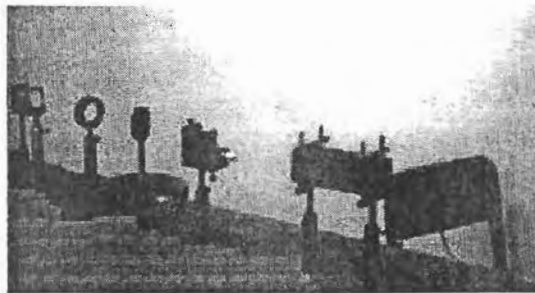


Figura 3.1 Interferograma de Fizeau. Montado en el laboratorio de física de la UTM.

3.5 Interferogramas obtenidos.

Las dimensiones de los interferogramas obtenidos son de 512x486. En la figura 3.2 se muestran dos de los interferogramas obtenido.

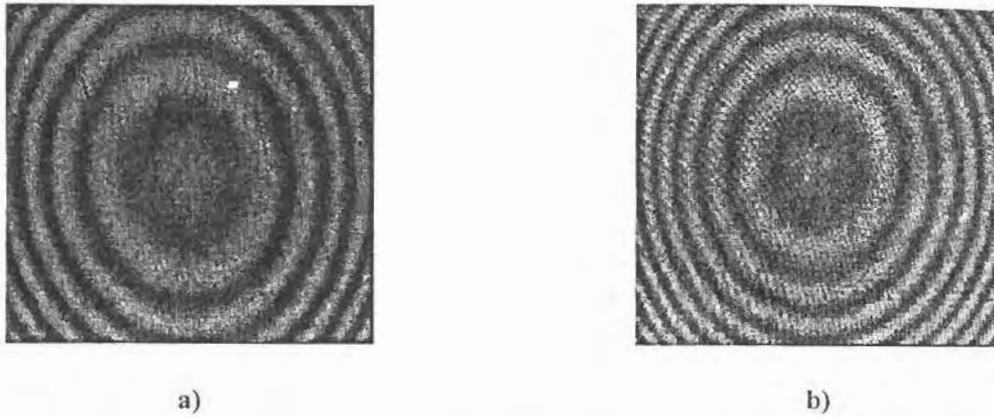


Figura 3.2 Interferogramas capturados. La figura a) muestra una superficie cónica con un radio de 1.5m y la figura b) muestra otra superficie con un radio de curvatura de 2.0m. las dos superficies son cónicas convexas.

3.6 Constante de conicidad y radio de curvatura.

En esta sección se explica como se obtuvo la expresión que nos permite conocer el valor del radio de curvatura y la constante de conicidad de la zona de la superficie cónica a evaluar. El radio de curvatura depende de la separación de las franjas del patrón de interferencia (producido por la superposición de los haces reflejados en el plano óptico y la zona de la superficie bajo prueba) ver figura 3.3, así para el caso de interferencia constructiva se debe cumplir que [18].

$$z_n - z_{n-1} = \frac{\lambda}{2}, \quad (3.1)$$

$$z_n - z_{n-2} = \lambda \quad (3.2)$$

donde λ es la longitud de onda del láser, z_n , z_{n-1} , y z_{n-2} son las sagitas ver figura 1.4, las cuales están dada como [19]

$$Z_n = \frac{X_n^2 c}{1 + \sqrt{1 - (k+1)c^2 X_n^2}}, \quad (3.3)$$

$$Z_{n-1} = \frac{X_{n-1}^2 c}{1 + \sqrt{1 - (k+1)c^2 X_{n-1}^2}}, \quad (3.4)$$

$$Z_{n-2} = \frac{X_{n-2}^2 c}{1 + \sqrt{1 - (k+1)c^2 X_{n-2}^2}}, \quad (3.5)$$

siendo c la curvatura paraxial de la superficie bajo prueba, que a su vez esta dada como $c = 1/r$, donde r es el radio de curvatura paraxial, k es la constante de conicidad, y X_n , X_{n-1} , y X_{n-2} es la separación de las franja al centro del patrón de interferencia.

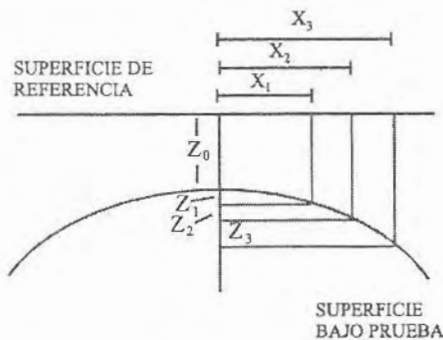


Figura 3.3. Montaje de master y superficie bajo prueba

Sustituyendo (3.3), (3.4) y (3.5) en (3.1) y (3.2) para tres franjas consecutivas, y resolviendo para la constante de conicidad y radio de curvatura k y r , se obtiene

$$k = \frac{2[2X_{n-1}^2 - (X_n^2 + X_{n-2}^2)] - \lambda^2}{\lambda^2}, \quad (3.6)$$

$$r = \frac{\sqrt{\left[(X_n^2 - X_{n-1}^2 - (k+1)\lambda^2 / 4)^2 + (k+1)\lambda^2 X_n^2 \right]}}{\lambda}. \quad (3.7)$$

3.7 Análisis de errores.

Como se puede ver en las ecuaciones (3.6) y (3.7) estas solo dependen de la longitud de onda, λ , de la fuente de luz empleada y de la separación de las franjas al centro del patrón de interferencia.

Es importante mencionar que el patrón de interferencia obtenido con el interferómetro de Fizeau, fue capturado con una cámara de CCD, y procesado posteriormente para obtener la separación de las franjas.

Para encontrar el error cometido al medir el radio de curvatura, se ve de la ecuación (3.7) que este sólo depende de la precisión con la que se mida la separación de las franjas al centro del patrón. Ya que suponemos que la longitud de onda de la fuente λ (se utilizó un láser de He-Ne.), permanece constante. Así al derivar la ecuación (3.7) con respecto a X_n , X_{n-1} y X_{n-2} , y tomando $dX_n = dX_{n-1} = dX_{n-2} = dX$, (debido a que este error depende del tamaño del pixel de la cámara de CCD que es idéntico en cualquier parte del detector), la incertidumbre resulta ser

$$dr = \frac{(3/2X_n^2 - 2X_{n-1}^2 + 1/2X_{n-2}^2)(3X_n - 4X_{n-1} + X_{n-2})dX + \Omega}{\lambda \sqrt{[(X_n^2 - X_{n-1}^2 - (k+1)\lambda^2/4)^2 + (k+1)\lambda^2 X_n^2]}} \quad (3.8)$$

donde

$$\Omega = [4X_{n-1} - 2(X_n + X_{n-2})]X_n^2 dX + 2[2X_{n-1}^2 - (X_n^2 + X_{n-2}^2)]X_n dX \quad (3.9)$$

3.8 Conclusiones.

Se presentó un análisis del interferómetro de Fizeau y las expresiones encontradas al evaluar superficies cónicas convexas, para conocer r y k , también se presenta un análisis de error, el cual será introducido por el detector.

Al montar el interferómetro se presentan varios problemas como el alineamiento de las componentes y la captura de los interferogramas, ya que se debe enfocar la cámara entre el divisor y la superficie bajo prueba.

Las expresiones utilizadas nos permiten conocer el radio de curvatura y la constante de conicidad de la zona bajo prueba, junto con la incertidumbre.

Capítulo 4

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SOFTWARE

4.1 Introducción

El análisis y diseño de problemas para su solución por medio de la Ingeniería de Software es muy importante, debido a las herramientas que esta proporciona. El desarrollo de soluciones computarizadas para la prueba de las superficies ópticas mencionadas en el capítulo I, ha empezado a tener un gran auge debido al desarrollo de los sistemas y el avance tecnológico.

Los diagramas de estructuras nos ofrecen un método para representar la estructura de un programa. En las siguientes secciones se muestran de una forma detallada y precisa los diagramas para el sistema “DFizeau”. Estos diagramas nos muestran su estructura, así como sus módulos, sus almacenamientos de datos, y sus interconexiones. Las especificaciones de los módulos son una herramienta muy importante en nuestro diseño del software. Las especificaciones de módulos explican qué hace cada módulo, mientras que el diagrama de estructura muestra la estructura del programa.

4.2 Análisis del sistema DFizeau.

El problema a resolver consiste en encontrar la separación de las franjas de interferencia partir de un interferograma de Fizeau obtenido. Este análisis de imágenes permitirá conocer la constante de conicidad (k) y el radio de curvatura (r). Para ello se captura la imagen (interferograma) por medio de una cámara CCD y se guarda en el disco duro, la imagen debe ser guardada en formato "bmp" para poder ser procesadas de tal manera que sean fáciles de manejar.

El Sistema que se propone, deberá obtener la separación de las franjas de manera automática, para poder obtener k y r .

La Herramienta de programación utilizada será Delphi, la cual es una herramienta poderosa en programación.

4.3 Diseño del sistema DFizeau.

El diseño es una de las herramientas más importantes en el desarrollo de cualquier sistema, es el desarrollo sistemático de la solución de un problema. Sólo se puede realizar después de que el problema ha sido previamente estudiado y definido. El diseño nos permite representar la solución utilizando una notación formal y la utilización de herramientas establecidas, como diagramas, gráficas, modularidad, entre otros. Mejor aún, nos permite

comprobar la calidad y la objetividad antes de implementar la solución, permitiendo realizar de una manera sencilla cambios en el programa.

El sistema será dividido en unidades fácilmente manejables, llamadas módulos; que son implementaciones en código de procedimientos o funciones.

Más adelante se mostrarán los diagramas de estructura del sistema, estos diagramas nos ofrecen un método para representar la estructura de un programa. En estos se muestran: su estructura, sus módulos, sus almacenamiento de datos (en caso de que los tenga), así como sus interconexiones. Por otro lado los diagramas de estructura no muestran: el orden en que las llamadas a los módulos ocurren, cuantas veces el módulo se llama, las condiciones en las cuales se llame al módulo, como funciona el módulo, ni la descripción del módulo.

A continuación se muestra el esquema general de los módulos del sistema Dfizeau. Estos módulos fueron debidamente seleccionados para un mejor funcionamiento de dicho sistema (ver figura 4.1).

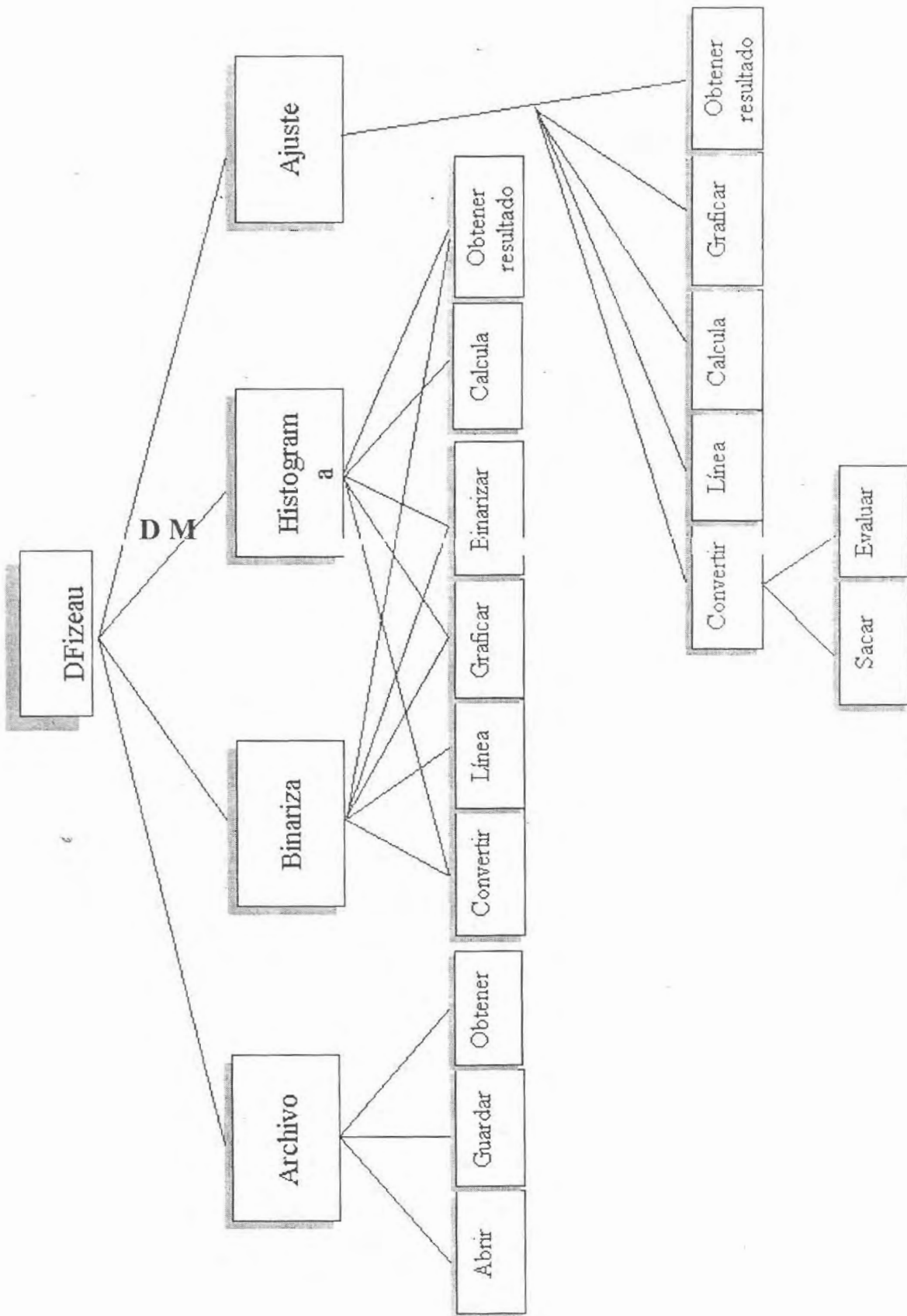


Figura 4.1. Esquema general del sistema.

4.4 Descripción de los Módulos y su respectivo diagrama de estructuras.

El formato de presentación de los módulos será de la siguiente manera. Primero se pondrá la imagen del diagrama y enseguida su descripción con el siguiente formato: Nombre (es el nombre del módulo a especificar.), Función (Una breve descripción de lo que hace dicho módulo), Entrada (son los parámetros de entrada del módulo), Salida(Parámetro de salida del módulo).

El primer nivel esta compuesto por un solo módulo como se puede observar en la figura 4.2. El módulo DFizeau es el módulo principal del sistema, es el módulo que realiza toda la conjunción de las operaciones.

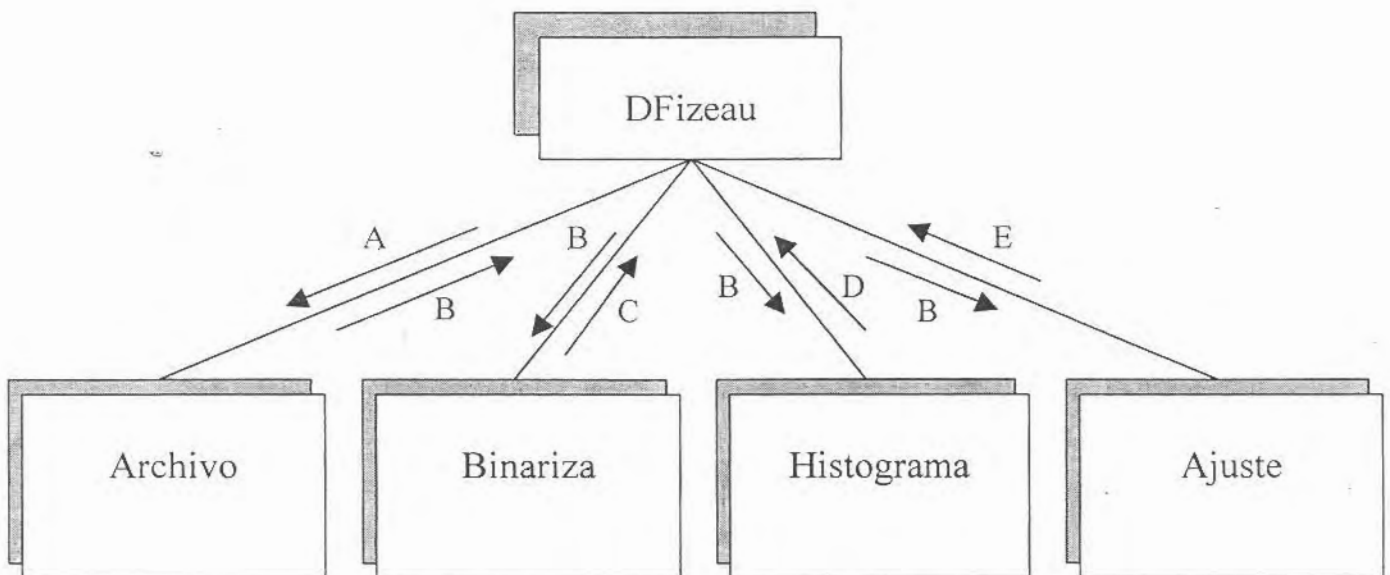


Figura. 4.2. Primer nivel, módulo DFizeau

- A: Solicitud de archivo.
- B: Datos temporales de la imagen.
- C: Archivo.
- D: Nueva imagen por histograma.
- E: Archivo de ajuste.



Dfizeau

Nombre: **Archivo.**

Función: Obtener la imagen a analizar.

Entrada: Solicitud de archivo.

Salida: Datos temporales del archivo.

Nombre: **Binariza.**

Función: Convertir la imagen a binaria.

Entrada: Datos de la imagen.

Salida: Imagen binarizada.

Nombre: **Histograma.**

Función: Calcular el histograma de la imagen.

Entrada: Datos de la imagen.

Salida: Nueva imagen por histograma.

Nombre: **Ajuste.**

Función: Ajustar la imagen por medio de SPLINS.

Entrada: Datos de la imagen.

Salida: Nueva imagen por ajuste.

El Segundo nivel esta compuesto por 4 módulos como se pudo observar en la figura 4.2. El módulo Archivo ver figura 4.3, realiza todas las tareas relacionadas con abrir, guardar u obtener datos relacionados con la imagen.

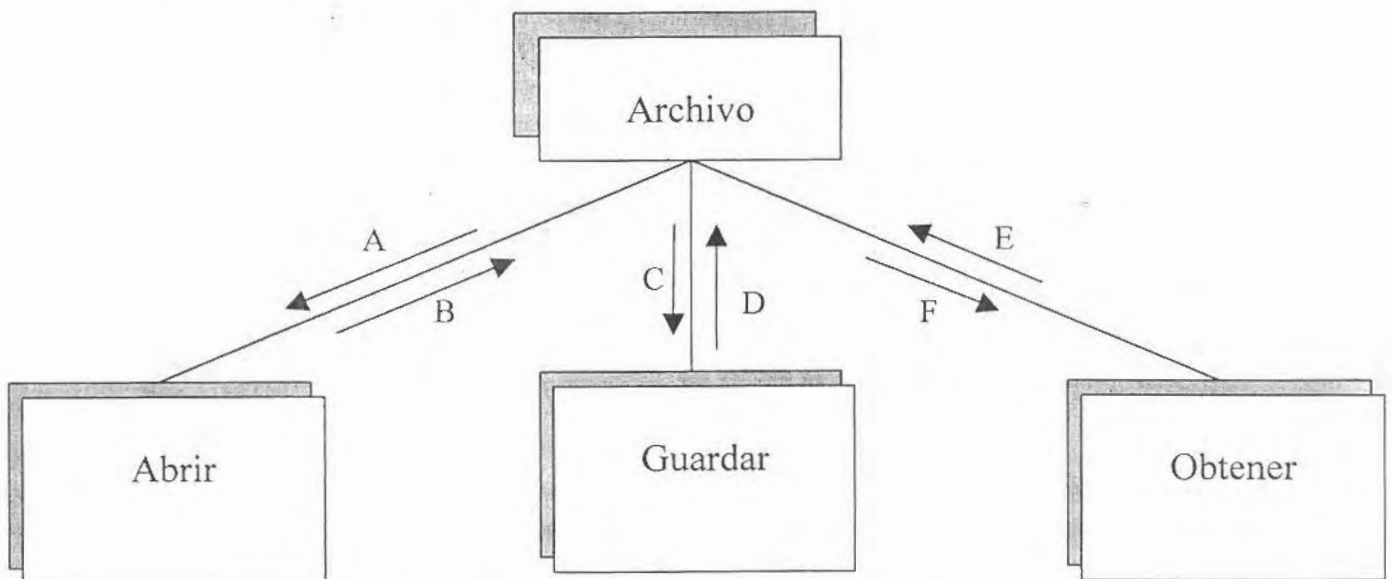


Figura. 4.3. Segundo nivel, módulo Archivo.

A: Solicitud de archivo.

B: Nombre de archivo.

C: Nombre del archivo.

D: Archivo guardado.

E: Archivo con nuevo nombre.

F: Datos del archivo.

Nombre: **Abrir.**

Función: Abre la imagen a analizar.

Entrada: Solicitud de archivo.

Salida: Nombre del archivo.

Nombre: **Guardar.**

Función: Guardar el archivo analizado.

Entrada: Nombre del archivo.

Salida: Archivo guardado.

Nombre: **Guardar como.**

Función: Almacenar el archivo abierto actualmente.

Entrada: Nombre del archivo.

Salida: Archivo con nuevo nombre.

Nombre: **Obtener.**

Función: Obtener los datos de la imagen para poder ser analizada.

Entrada: Nombre del archivo.

Salida: Datos temporales de la imagen.

El módulo Binariza ver figura 4.4, realiza todas las operaciones para binarizar la imagen, con la ayuda de los datos arrojados por el módulo anterior.

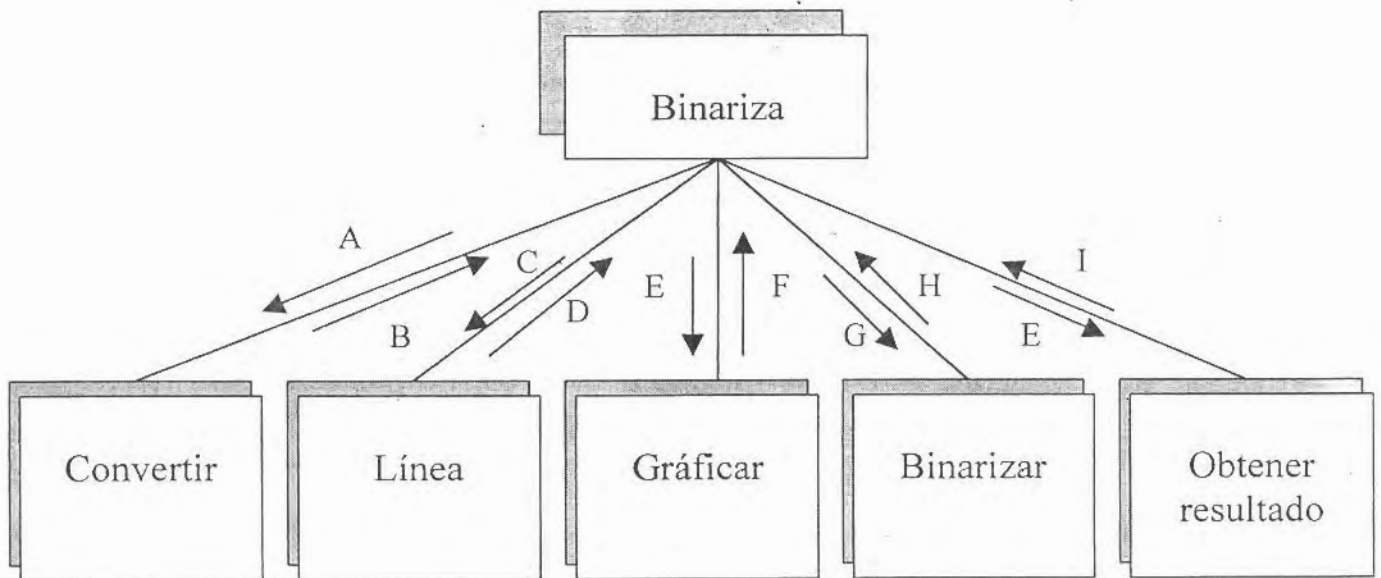


Figura. 4.4. Segundo nivel, módulo Binarizar.

A: Datos temporales de la imagen.

B: Datos finales de la imagen.

C: Pedir línea de análisis.

D: Datos de la línea a binarizar.

E: Datos de la línea de barrido.

F: Gráfica mostrada.

G: Datos de la línea a binarizar.

H: Línea binarizada.

I: Visualiza resultado.

Nombre: **Convertir.**

Función: Convierte los datos de la imagen de forma tal que sean mejor interpretados.

Entrada: Datos temporales de la imagen.

Salida: Datos finales de la imagen.

Nombre: **Línea.**

Función: Obtener una línea de barrido para ser analizada.

Entrada: Pedir línea de análisis.

Salida: Datos de la línea a binarizar.

Nombre: **Gráficar.**

Función: Visualizar los datos de línea de barrido en una Gráfica.

Entrada: Datos de la línea de barrido.

Salida: Gráfica mostrada.

Nombre: **Binarizar.**

Función: Crear un estándar de binarización y convertir la imagen a binaria.

Entrada: Datos de la línea a binarizar.

Salida: Línea binarizada.

Nombre: **Obtener resultado.**

Función: Evaluar los datos de la imagen y mostrar resultados.

Entrada: Datos de la línea de barrido.

Salida: Visualiza resultado.

El módulo Histograma figura 4.5, nos ayuda a obtener las separaciones de las franjas de manera similar que el módulo binariza.

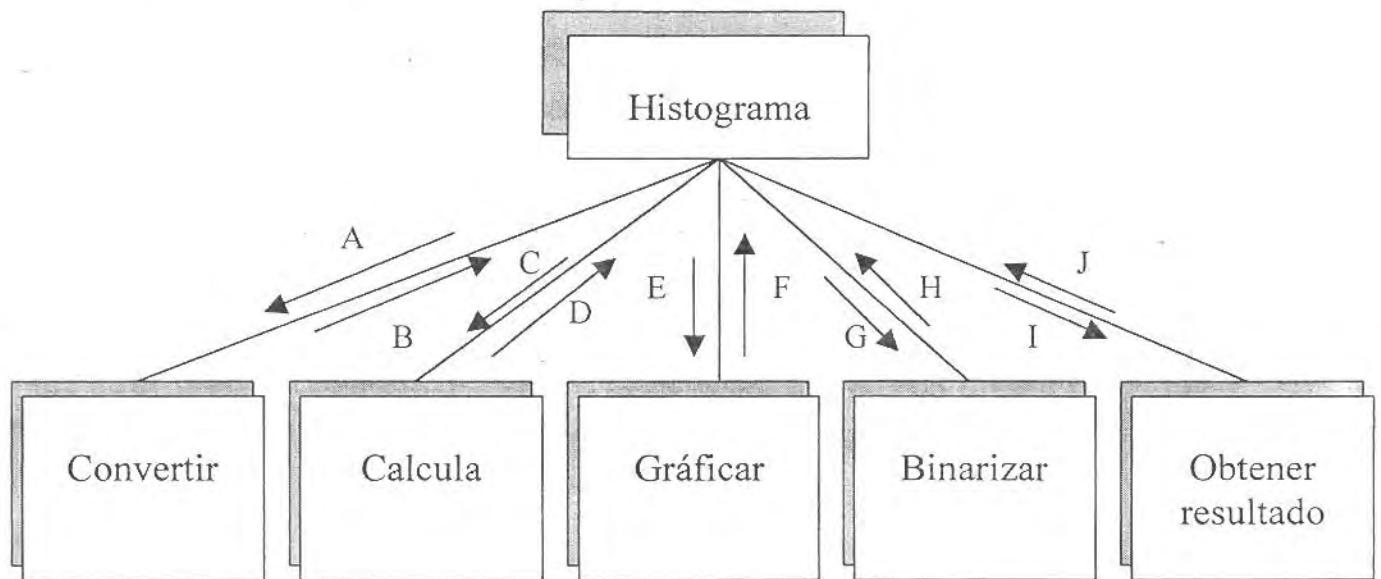


Figura. 4.5. Segundo nivel, Histograma.

A: Datos temporales de la imagen.

B: Datos finales de la imagen.

C: Datos finales de la imagen.

D: Matriz de repeticiones.

E: Matriz de repeticiones.

F: Gráfica mostrada.

G: Matriz de repeticiones.

H: Imagen binarizada.

I: Imagen binarizada.

J: Mostrar resultados.

Histograma

Nombre: **Convertir.**

Función: Convierte los datos de la imagen de forma tal que sean mejor interpretados.

Entrada: Datos temporales de la imagen.

Salida: Datos finales de la imagen.

Nombre: **Calcula.**

Función: Obtener todas las repeticiones de intensidades de la imagen y guardarlas en una matriz.

Entrada: Datos finales de la imagen.

Salida: Matriz de repeticiones.

Nombre: **Gráficar.**

Función: Visualizar los datos de línea de barrido en una Gráfica.

Entrada: Matriz de repeticiones.

Salida: Gráfica mostrada.

Nombre: **Binarizar.**

Función: Crear un estándar de binarización y convertir la imagen a binaria.

Entrada: Matriz de repeticiones.

Salida: Imagen binarizada.

Nombre: **Obtener resultado.**

Función: Evaluar los datos de la imagen y mostrar resultados.

Entrada: Imagen binarizada.

Salida: Mostrar resultados.

El módulo Ajuste figura 4.6, realiza las mismas funciones que el módulo Binariza e Histograma pero con otro método. En este método se utiliza la media para poder obtener las coordenadas necesarias.

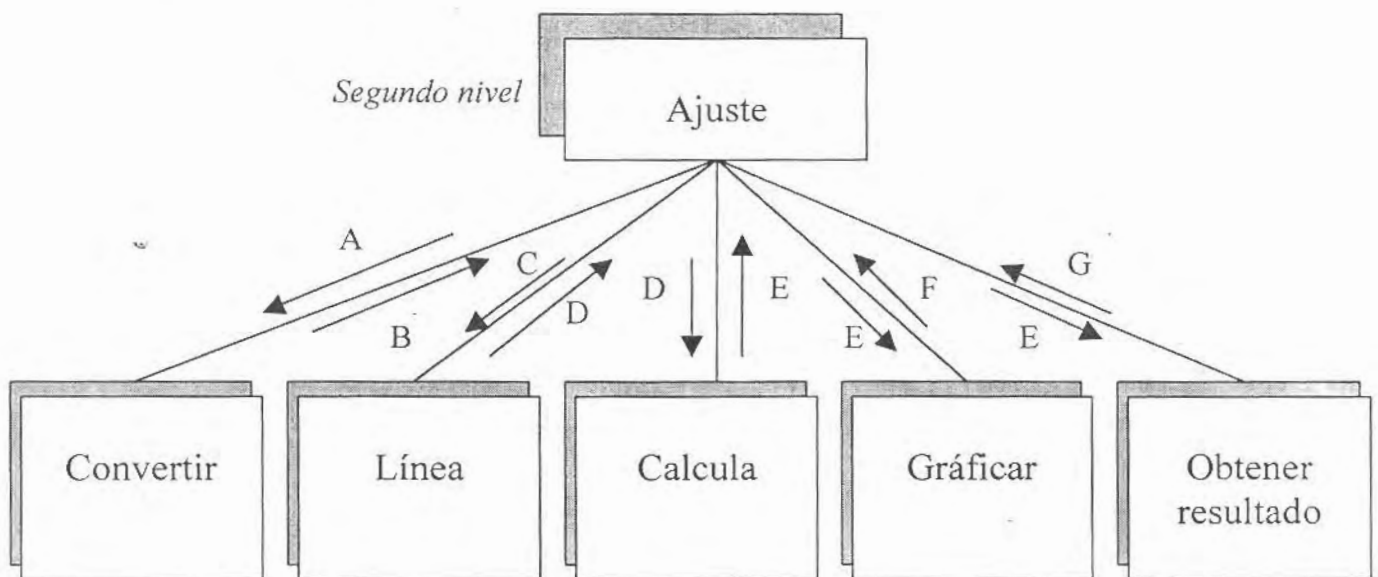


Figura. 4.6. Segundo nivel, módulo Ajuste.

A: Datos temporales de la imagen.

B: Datos finales de la imagen.

C: Pedir línea de análisis.

D: Datos de la línea a barrido.

E: Datos ajustados.

F: Gráfica de los datos.

G: Mostrar resultados.

Histograma

Nombre: **Convertir.**

Función: Convierte los datos de la imagen de forma tal que sean mejor interpretados.

Entrada: Datos temporales de la imagen.

Salida: Datos finales de la imagen.

Nombre: **Línea.**

Función: Obtener una línea de barrido para ser analizada.

Entrada: Pedir línea de análisis.

Salida: Datos de la línea de barrido.

Nombre: **Calcula.**

Función: Obtener el ajuste de la curva de los datos de la línea de barrido.

Entrada: Datos de la línea a barrido.

Salida: Datos ajustados.

Nombre: **Gráficar.**

Función: Visualizar los datos de línea de barrido en una Gráfica.

Entrada: Datos ajustados.

Salida: Gráfica mostrada.

Nombre: **Obtener resultado.**

Función: Evaluar los datos de la línea de barrido ajustados.

Entrada: Datos ajustados.

Salida: Mostrar resultados.

El módulo Convertir figura 4.7, realiza las operaciones necesarias para obtener los datos de la imagen, de tal manera que sean más fáciles de entender.

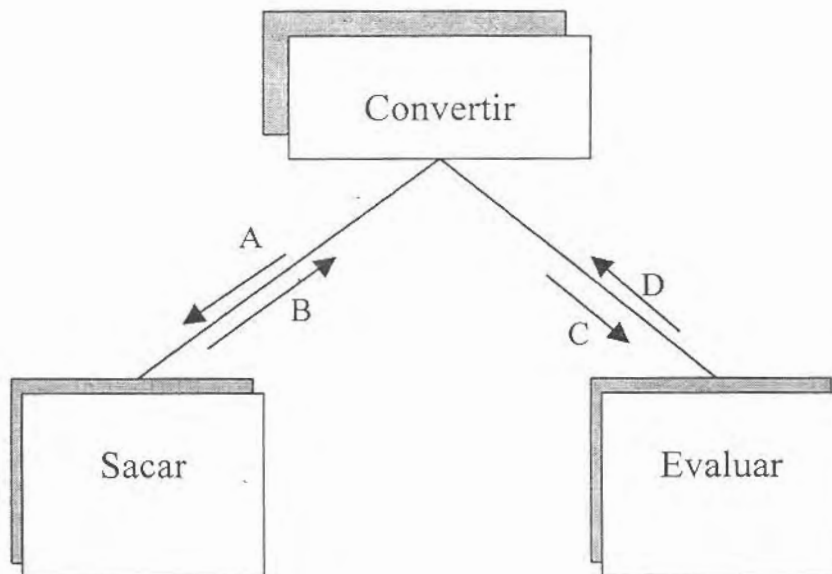


Figura. 4.7. Tercer nivel, módulo Convertir.

A: Datos temporales de la imagen.

B: Datos obtenidos en una matriz.

C: Datos de la matriz.

D: Datos finales de la imagen.

Convertir

Nombre: **Sacar.**

Función: Obtener los datos de la matriz temporal de la imagen para evaluarlos.

Entrada: Datos temporales de la imagen.

Salida: Datos obtenidos de la matriz.

Nombre: **Evaluar.**

Función: Evaluar los datos obtenidos y convertirlos en datos más entendibles.

Entrada: Datos de la matriz.

Salida: Datos finales de la imagen.

4.5 Restricciones del software.

Las limitaciones del sistema son pocas, debido a que el sistema fue diseñado para cualquier tamaño de imagen ver Figura 4.7, de tal forma que el sistema pueda obtener los resultados necesarios.

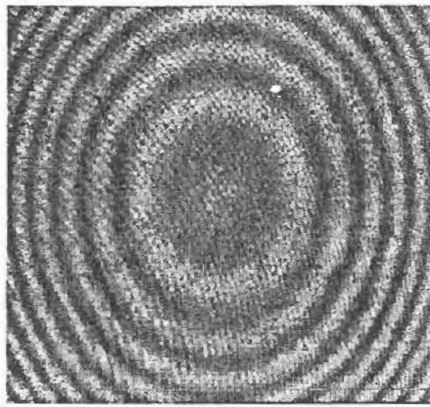


Figura 4.8. Interferograma obtenido.

Los interferogramas que pueden ser procesados deben tener la forma de anillos concéntricos mostrados en la figura 4.8, las dimensiones de la imagen deben ser superiores a los 512x486 para un mejor funcionamiento.

Las características mínimas necesarias de la computadora personal son: Pentium MMX-2 a 300Mhz, con una resolución de pantalla de 16 bits (800x600), con una memoria de 64Mb; ó cualquier sistema compatible.

El utilizaron las herramientas de Ingeniería de Software. La manera de programar fue del tipo Top-Down (o programación hacia abajo), esta herramienta nos permite empezar con el módulo principal hasta llegar a los módulos de los niveles más bajos.

Las pruebas realizadas fueron de caja negra y blanca, es decir las de caja blanca es cuando se conocen todas las variantes de los módulos probados, y las de caja negra solo conocemos las entradas, pero no las salidas.

4.6 Conclusiones.

Las herramientas utilizadas de Ingeniería de Software, fueron de gran utilidad. La descripción de módulos, la modularidad, el tipo de programación Top-Down, permitirán en un futuro si así se requiere, modificar con mayor facilidad las características del sistema.

La especificación de los diagramas de módulos permiten ver el sistema de una manera fácil y sencilla.

La modularidad funcionó para que muchos de los procedimientos realizados en el sistema, pudieron ser reutilizados, de tal forma que el código del programa se hiciera más pequeño.

Capítulo 5

PRUEBAS

5.1 Introducción.

Como se mostró anteriormente, para conocer el radio de curvatura y la constante de conicidad de la zona bajo prueba, es necesario conocer la separación de las franjas de interferencia así como la longitud de onda de la fuente que se utiliza. Respecto a la fuente de luz, se utilizó un láser de He-Ne con $\lambda=632.8$ nm.

Para medir la separación de las franjas de interferencia, se implementó un algoritmo de computó, el cual, permite conocer la separación de las franjas en orden de pixeles, para ello se digitaliza el patrón de interferencia, y se toma una línea de barrido que pase por el centro del patrón, en la cual, se realizará la lectura de irradiancia de cada uno de los pixeles en función de su posición. Ésto, permite conocer el ancho y separación de las franjas en esa línea de barrido.

5.2 Generalidades.

El hardware utilizado para las pruebas del sistema es una maquina con procesador AMD-K6-2 a 500MHz, tarjeta de video de 8Mb, disco duro de 36Gb, tarjeta de video con una resolución de 1024x768.

Para ilustrar el funcionamiento del algoritmo que obtiene la separación entre las franjas; presentamos el interferograma de una superficie bajo prueba capturado en el laboratorio de física, ver figura 5.1.

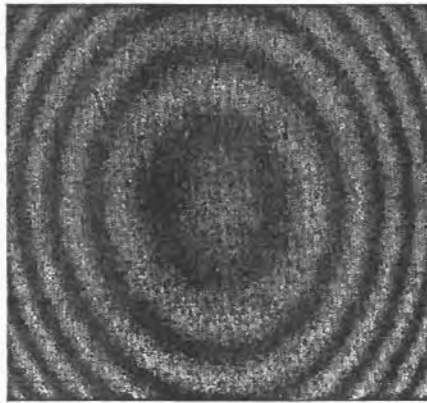


Figura 5.1. Patrón de interferencia capturado.

Los problemas que se presenta al realizar esta tarea es ubicar el centro del patrón de interferencia y ubicar los bordes de las franjas; esto es debido a la forma irregular que presentan las franjas. Para resolver estos problemas, primero se digitaliza el patrón de interferencia con una cámara de CCD de 512x486 pixeles.

Un pixel de la cámara CCD con la que se trabajo tienen una longitud de 13 micras de ancho en dirección X, y 11 micras de alto en la dirección Y.

Para conocer la posición del centro de la franja central (centro del patrón de interferencia) en los diferentes procesos que se mencionan más adelante, se realizan lecturas de irradiancia en dirección horizontal y vertical que pasan por la franja central, para definir el tamaño de la franja central y la posible ubicación del centro del patrón de interferencia (ubicar las coordenadas del pixel central). En este proceso se buscó que pixeles formaban parte de la franja central, limitándolos en una región rectangular, el pixel central quedo definido al tomar la mitad de este ancho y largo.

Una vez conocida la ubicación del centro de la franja central, se toma una línea de barrido horizontal que pasa por este punto, y se mide la irradiancia de cada uno de las pixeles en función de su posición ver figura 5.2. Como se puede ver los bordes de las franjas no están bien limitados, es decir, el nivel de gris varia de pixel a pixel, lo que impide determinar los bordes de las franjas luminosas y oscuras. Así, para suavizar los bordes de las franjas de manera homogénea, se elige un valor de umbral (nivel de gris), con ayuda de la figura 5.2.

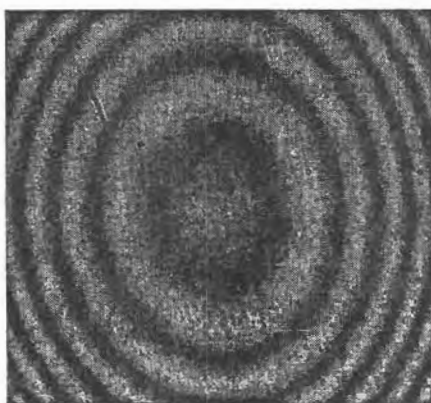


Figura 5.1. Patrón de interferencia capturado.

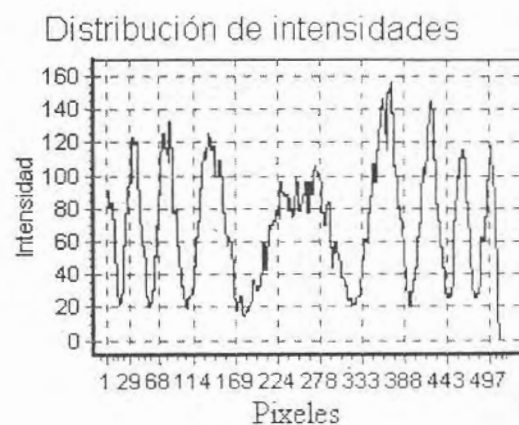


Figura 5.2. Distribución de irradiancias.

Una de las maneras para encontrar las posiciones de los centros de las franjas es observar la distribución de las irradiancias, ver figura 5.2, que se obtuvieron al tomar la línea de barrido en $Y = 243$. Como se puede ver la franja central es siempre la más ancha, al tomar los puntos más bajos y hacer un acercamiento a los valores de cada pico inferior, se puede ir conociendo el ancho de cada franja, incluyendo la franja central, restando el dato mayor de pixeles al menor, el resultado dividirlo entre 2, así encontramos el centro de la franja principal. La centros de las otras franjas se encuentra de la misma manera como se encontró el centro de la franja central. Una vez obtenidos todos los centros de las franjas se pueden obtener la separación de las franjas con respecto al centro principal. La tabla 5.1 muestra como quedaron los centros y las distancias respectivas de cada franja realizando el procedimiento manual.

Tabla 5.1. Valores de la imagen original

	IMAGEN REAL		DISTANCIAS	
	(CENTROS) (Pixeles)			
Centro	X =251	Y =243	Pixeles	Metros
X1	X =360	Y =243	109	0.001417
X2	X =420	Y =243	169	0.002197
X3	X =463	Y =243	212	0.002756

Para suavizar los bordes de las franjas de manera homogénea y de forma automática, para obtener la separación de las franjas , se implementaron tres metodos diferentes:

- Binarización
- Binarización por Histograma.
- Ajuste por medio de SPLINS.

A continuación se explica en que consiste cada uno de ellos.

5.3 Método de Binarización.

En el primer método se elige un valor de umbral (nivel de gris), con ayuda de la figura 5.2. El cual permite establecer que pixeles pertenecen o no a cada franja de interferencia. Este método es muy subjetivo ya que depende del valor que asigne el usuario al umbral.

Esto es, al elegir un valor de umbral, se convertirá en el patrón de interferencia en un patrón de franjas brillantes y oscuras, ver figura 5.3. Así, pixeles con intensidad mayor al umbral son enviados al nivel de gris máximo (255) y los pixeles con irradiancia menores o iguales al umbral son enviados al nivel de gris mínimo (0).

Al medir nuevamente la distribución de irradiancia de los pixeles en la misma línea de barrido en el nuevo patrón de interferencia binario, se obtiene la figura (5.4), que es donde finalmente se mide la separación de las franjas.

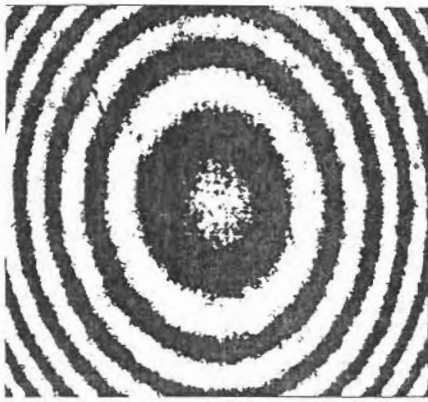


Figura 5.3. Patrón de interferencia binario.

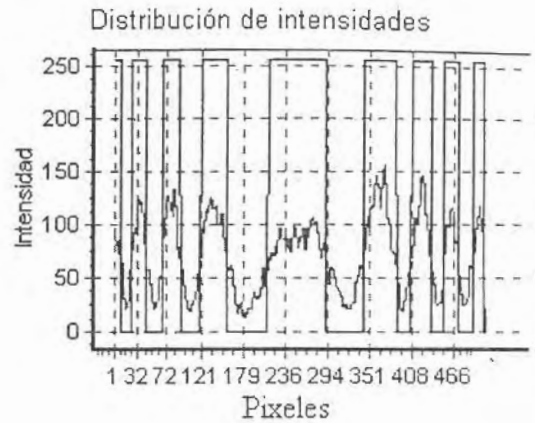


Figura 5.4. Distribución de irradiancia finales.

Es importante mencionar que los interferogramas que se digitalizaron tienen un tamaño de 512×486 píxeles, y que la ubicación vertical de la línea de barrido que se tomó fue el número 243, quedando el centro del patrón de interferencia localizado en el píxel con coordenadas (252, 243). La separación de las tres primeras franjas con respecto al centro del patrón de interferencia resultan ser de 114, 170 y 212 píxeles. Con estos valores se obtuvieron las posiciones de los centros de las franjas, ver tabla 5.2.

Tabla 5.2. Valores de la imagen binarizada

	IMAGEN BINARIZADA (CENTROS) (Píxeles)		DISTANCIAS	
	X	Y	Píxeles	Metros
Centro	X=252	Y=243		
X1	X=366	Y=243	114	0.001482
X2	X=422	Y=243	170	0.002210
X3	X=464	Y=243	212	0.002756

5.4 Binarización por Histograma.

En el segundo método se hace uso del histograma de la imagen en su forma sencilla, es decir, se hace un barrido completo de la imagen y se van tomando los datos de tono de grises de cada píxel. El sistema (DFizeau) asigna un valor de umbral al nivel de gris que más veces apareció en la imagen. En este caso arroja un valor de 4170 repeticiones del tono 23, ver figura 5.5.

Con este valor de umbral se repite el proceso anterior y se procede a binarizar la imagen para encontrar las posiciones de los centros de las franjas (separaciones), ver figura 5.6.



Figura 5.5. Distribución de repeticiones de tonos..

Al medir nuevamente la distribución de irradiancia de los píxeles con la misma línea de barrido en el nuevo patrón de interferencia binario, se obtiene la figura 5.7, donde finalmente se mide la separación de las franjas.

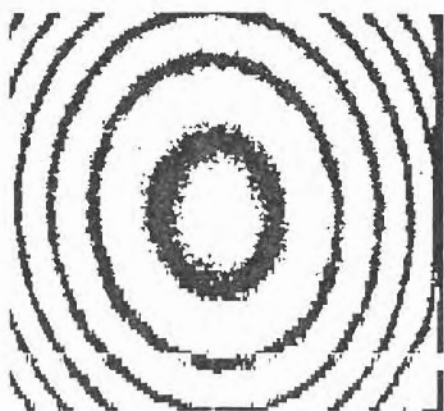


Figura 5.6. Patrón de interferencia binario.



Figura 5.7. Distribución de irradiancia final.

Después de realizar este proceso para encontrar los centros, el centro principal queda en las coordenadas (256, 243). La separación de las tres primeras franjas con respecto al centro del patrón queda como en la tabla 5.3.

Tabla 5.3. Valores de la imagen binarizada por histograma

	IMAGEN BINARIZADA POR HISTOGRAMA (CENTROS) (Píxeles)		DISTANCIAS	
	X	Y	Píxeles	Metros
Centro	X=256	Y=243		
X1	X=364	Y=243	108	0.001404
X2	X=422	Y=243	166	0.002158
X3	X=464	Y =243	208	0.002704

5.5 Ajuste.

En el tercer y ultimo proceso se utiliza un ajuste de curvas por medio de pequeñas parábolas. El menor número de datos que se pueden tomar para este método es de dos pixeles, y la longitud menor de los datos totales debe ser mayor a dos.

Para nuestro caso sea un arreglo de datos (pixeles) $[X, X + 1, X + 2, X + 3, X + 4, \dots, X + N]$, del cual tomamos tres pixeles para obtener la parábola que pasa por esos puntos $(X, X + 2, X + 4)$, una vez realizado el proceso para encontrar la parábola que pasa por esos puntos, tenemos que encontrar $X + 1$ y $X + 3$, para poder cerrar la parábola correctamente. Esto quiere decir que primero calculamos los puntos tomados automáticamente por el sistema y después el sistema se encarga de calcular los puntos intermedios restantes.

Después de realizar el ajuste con una muestra de 5 pixeles, se realiza otro ajuste pero con la diferencia de que ahora se toman solo 3 pixeles de muestra, es decir, se toma X y $X + 2$, se calcula la parábola que pasa por los dos puntos y luego se calcula el valor intermedio $(X + 1)$. Esto se hace para tener una mejor aproximación de las curvas.

Una vez realizado el proceso de ajuste, se procede a encontrar el centro de la franja principal. Por las pruebas realizadas podemos decir que la franja central no es menor a 100 pixeles, ni mayor a 200 pixeles, así mismo podemos afirmar que las franjas siguientes van disminuyendo de tamaño, la primera franja no pasa de los 80 pixeles de ancho, la segunda franja de 50 pixeles, y la tercera de 40 pixeles.

Una vez tomadas las consideraciones anteriores podemos encontrar el centro de la franja principal de manera automática, así como los centros de las demás franjas. Es decir podemos calcular las separaciones de las franjas.

Al medir nuevamente la distribución de irradiancia de los píxeles en la misma línea de barrido ($Y = 243$) en el nuevo patrón de interferencia del ajuste, se obtiene la figura 5.8, que es donde finalmente se mide la separación de las franjas. Obteniendo una distribución de irradiancia mostrada en la figura 5.9.

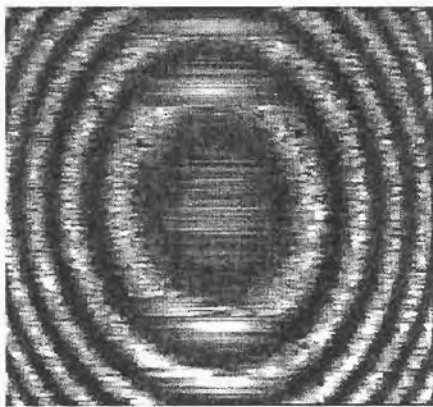


Figura 5.8. Patrón de interferencia ajustada.

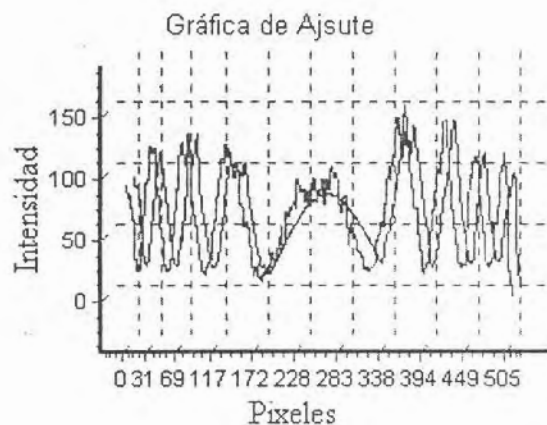


Figura 5.9. Distribución final de irradiancia por el método ajuste.

Ahora el centro de la imagen nos queda en las coordenadas (253, 243). La separación de las tres primeras franjas con respecto al centro del patrón son mostradas como en la tabla 5.4.

Tabla 5.4. Valores de la imagen Ajustada.

Centro	IMAGEN AJUSTADA (CENTROS) (Píxeles)		DISTANCIAS	
	X =252	Y =243	Píxeles	Metros
X1	X =361	Y =243	110	0.001430
X2	X =421	Y =243	169	0.002197
X3	X =467	Y =243	212	0.002756

Analizando la figura 5.9, observamos que existe un corrimiento hacia la derecha de dos píxeles aproximadamente.

5.6 Análisis de datos.

Como podemos observar los datos arrojados son muy parecidos (Ver tabla 5.5).

Tabla 5.5. Comparación de métodos.

Centro (píxeles)	REAL		BINARIZADA		HISTOGRAMA		AJUSTE	
	X = 251		X = 252		X = 256		X = 253	
	píxeles	Metros	píxeles	Metros	píxeles	Metros	píxeles	Metros
X1	109	0.001417	114	0.001482	108	0.001404	110	0.001430
X2	169	0.002197	170	0.002210	166	0.002158	169	0.002171
X3	212	0.002756	212	0.002756	208	0.002704	212	0.002756

Las diferencias encontradas en los pixeles entre los resultados obtenidos manualmente y los automatizados no varían demasiado. Las diferencias obtenidas se muestran en la tabla 5.6.

Tabla 5.6. Diferencia con respecto a la real.

	REAL		BINARIZADA		HISTOGRAMA		AJUSTE	
	pixeles	Metros	pixeles	Metros	pixeles	Metros	pixeles	Metros
Centro (pixeles)	0		-1		-5		-1	
X1	0	0	-5	-6.5e-5	1	-2.6e-5	-1	-1.3e-5
X2	0	0	-1	1.3e-5	3	2.6e-5	0	0
X3	0	0	0	0	7	5.2e-5	0	0

El signo negativo significa que hubo un corrimiento hacia la derecha, y el signo positivo indica que hay un corrimiento hacia la izquierda.

Como podemos ver en la tabla 5.6, el proceso del ajuste nos arroja la diferencia menor con respecto a los datos obtenidos manualmente, también se observa que, dos de las franjas están a la misma distancia del centro del patrón.

Este proceso se aplicó a tres interferogramas más, obteniéndose mejores resultados al evaluar con el método de ajuste.

Los valores obtenidos de las separaciones de las franjas con los métodos propuestos se utilizaron para conocer el radio de curvatura y la constante de conicidad de la superficie

bajo prueba y se analizo cual arrojo el mejor valor. Para ello previamente se realizo la siguiente prueba.

Se coloco una plantilla de referencia (con círculos graduados) en el sistema y se digitalizo la imagen con la cámara CCD, posteriormente, al procesarla con el sistema implementado, se encontró el factor de amplificación m introducido en la dirección de barrido (dirección horizontal). Para con ello, conocer como se distorsiona la imagen real por el sistema implementado de captura – procesamiento.

Con este factor de amplificación m , se procedió a la captura de los interferogramas y las separaciones de las franjas al centro del patrón y se multiplicaron por el factor de amplificación. Obteniéndose como resultados de cada uno de los métodos implementados los valores mostrados en la tabla 5.7.

Tabla 5.7. Resultados con el factor de amplificación.

	BINARIZADA (M)	HISTOGRAMA(M)	AJUSTE (M)
X1	0.001482m	0.001404m	0.001430m
X2	0.002210m	0.002158m	0.002171m
X3	0.002756m	0.002704m	0.002756m

Es importante aclarar que estas expresiones fueron capturadas en el programa y requiere saber cual es el valor de amplificación para arrojar los resultados correctos.

El fabricante proporciona un radio de curvatura $r = 1.500$ metros, y una $k = 0$, el sistema arroja resultados similares, para binarización el radio es igual a 1.469 y una $k = -4.109811e-14$; para la binarización por histograma $r = 1.4382$ metros y $k = 5.40123e-14$; para el método de ajuste, $r = 1.500151$ y $k = 2.289592e-14$.

Finalmente estos valores fueron comparados con los proporcionados por el fabricante los cuales resultan muy similares con incertidumbre del orden de 2.070% para el método de binarización, 4.12% para el método de binarización por histograma y 0.0101% para el método de ajuste.

5.7 Conclusiones.

El análisis y evaluación de interferogramas (manera manual) resulta una labor tediosa y cuidadosa, y requiere de la inversión de tiempo relativamente grande.

Para agilizar esta labor, y proveer de una herramienta poderosa y practica al técnico. Se implementó una técnica para evaluar interferogramas de manera digital, utilizando el procesamiento digital de imágenes de manera automática.

Esta técnica consiste en tres métodos diferentes para evaluar los interferogramas; de las cuales, la técnica de ajuste arrojo los resultados que mejor se ajustan a los proporcionados por el fabricante.

Se observo que en las otras técnicas existen corrimientos en las interferencias debido a que la elección del umbral no son las más apropiadas, y a la hora de binarizar los interferogramas surge el corrimiento.

En el análisis presentado, este corrimiento ocasiona que las incertidumbres contenidas en la medición del radio sean del orden de 0.0101 % para el método de ajuste, el cual resulta ser el mejor.

Una desventaja de este algoritmo es que solo puede ser aplicada a interferogramas con formas circulares (anillos), que son los que generalmente se presentan al evaluar superficies esféricas y asféricas de revolución.

Una ventaja del algoritmo es que el tiempo de computo (alrededor de un par de minutos) es relativamente corto en comparación con el tiempo empleado en las técnicas tradicionales de evaluación.

Finalmente la estructura del algoritmo es amigable y fácil de entender que modificaciones al mismo pueden ser realizadas de manera sencilla.

Capítulo 6

CONCLUSIONES

Se presentó un método para conocer la forma de superficies cónicas convexas, el cual, consiste en conocer el radio de curvatura y la constante de conicidad a partir de medir la separación de las franjas de interferencia. El interferómetro que se implementó fue el interferómetro de Fizeau.

El método consiste en: montar el arreglo experimental del interferómetro de Fizeau, instalar la tarjeta de captura de video, así como la cámara CCD y el programa para poder guardar los interferogramas.

El procesamiento de los interferogramas de Fizeau obtenidos, se realizó de manera automática, fueron necesarios utilizar tres métodos diferentes, llamados: Binarización, Binarización por Histograma y Ajuste de curvas por medio de SPLINS.

A partir del patrón de interferencia digitalizado, el proceso de medición de la separación de las franjas de interferencias, así como, la obtención del radio de curvatura, y su incertidumbre se realizó de manera automática con el algoritmo implementado, permitiendo con ello agilizar el proceso de evaluación.

Como se vio uno de los problemas del método de Binarización, es que existe un corrimiento no uniforme, una de las causas puede ser que el umbral escogido no sea el adecuado, y ésto nos ocasione el corrimiento de las franjas.

En el método de Binarización por histograma la causa principal del corrimiento se debe a que el umbral encontrado por el sistema no se ajusta para todos los tonos de gris, es decir, o es muy grande o es muy pequeño.

Si el umbral es menor a 50, entonces quiere decir que la imagen esta muy oscura, y a la hora de binarizar las franjas quedan muy gruesas, por el contrario, el umbral es mayor a 90, quiere decir que el interferograma está muy claro.

En el método de ajuste una de las posibles causas de que exista un corrimiento, debido a que los picos o basura no son del todo constantes, y cuando son ajustados no todos los picos se eliminan. También se debe a que el ruido eliminado no es del todo total.

Una de las ventajas de este sistema Fizeau, es que es el único existente para evaluar interferogramas de Fizeau. El riesgo de fallo es casi nulo. Su manejo es intuitivo. Otra de las ventajas es que el grado de error es mínimo comparado con los métodos tradicionales para encontrar los radios de curvatura y la constante de conicidad, debido al análisis detallado de los interferogramas. Es fácil de usar, no ocupa mucho espacio en disco duro, no utiliza mucha memoria para poder ser ejecutado en una PC, se ejecuta en cualquier PC Pentium MMX-2 a 200MHz, o cualquier PC compatible o superior.

Una de las desventajas del sistema es que no trabaja con todo tipo de interferogramas, solo trabaja con aquellos que tengan la forma de círculos concéntricos. También no muestra resultados correctos si las dimensiones de la imagen son menores a 512x486. El proceso de muestra de resultados es tardado, debido a que los procesos realizados dentro del sistema son largos. Esto se debe a que:

- Se obtienen 248866 datos de la imagen.
- Se hacen las respectivas modificaciones a los datos para ser procesados.
- Se copian los datos a dos matrices.
- Para el método de Binarización se tiene que ir píxel por píxel, para cambiar los datos a 0 o 255.
- Para la Binarización por histograma, primero se encuentra el histograma de la imagen aplicando un barrido a toda la imagen, y luego se binariza.
- Para el ajuste de curvas, porque el ajuste se aplica a todas las líneas horizontales de la imagen.

El velocidad del proceso para mostrar resultados también depende de la velocidad del procesador de la PC donde se estén ejecutando las pruebas. El tiempo de respuesta del sistema es de la razón de un par de minutos.

Las restricciones mínimas para que el sistema funcione debidamente son que el procesador debe ser mayor o semejante a un Pentium MMX-2 a 200MHz, la resolución

mínima de la pantalla es de 800x600 a 16 Bits, memoria RAM mínima de 32Mb, Los interferogramas deben ser de 512x486 o más grandes, no mayores a 1024x768.

El software no fue probado en una PC menor a la especificada, además si en la PC mínima se tarda alrededor de 5 minutos para mostrar los resultados, en una menor por lo menos se tardaría el doble. Si la resolución disminuye de 800x600 la ventana del software no se vera adecuadamente. Entre mejor sean las características de la PC, el tiempo muestra de resultados disminuye. Si la imagen es más grande se corre el riesgo de que se desborde la matriz de datos del software y si es más pequeña el centro y las distancias no son las correctas, debido a franja central con la que se definió el sistema es de 100 pixeles como un estándar.

Finalmente podemos decir que el tamaño de los interferogramas puede variar de acuerdo a la cámara CCD utilizada en la captura de interferogramas. El sistema puede procesar varios tamaños de interferogramas entre 486x512 y 1024x768.

En un futuro el sistema puede ser robustecido, de tal manera que si se desea agregar nuevas funciones no sería tan difícil, debido a la facilidad para entender los módulos y la descripción y funcionamiento de ellos. El tipo de programación utilizada, ayuda a que las modificaciones en algún momento de terminado sean fáciles.

Nos falta decir que los resultados obtenidos, son aceptables para la aplicación para la que fue diseñado el sistema Fizeau.



Referencias

- [1].- Hecht, Zajac “Óptica”, Addison-Wesley Iberoamericana S.A., EUA, 293 (1986).
- [2].- Hecht, Zajac “Óptica”, Addison-Wesley Iberoamericana S.A., EUA, 294 (1986).
- [3].- Hecht, Zajac “Óptica”, Addison-Wesley Iberoamericana S.A., EUA, 296 (1986).
- [4].- Hecht, Zajac “Óptica”, Addison-Wesley Iberoamericana S.A., EUA, 297 (1986).
- [5].- Hecht, Zajac “Óptica”, Addison-Wesley Iberoamericana S.A., EUA, 298 (1986).
- [6].- Hecht, Zajac “Óptica”, Addison-Wesley Iberoamericana S.A., EUA, 299 (1986).
- [7].- Hecht, Zajac “Óptica”, Addison-Wesley Iberoamericana S.A., EUA, 299 (1986).
- [8].- Hecht, Zajac “Óptica”, Addison-Wesley Iberoamericana S.A., EUA, 301 (1986).
- [9].- Hecht, Zajac “Óptica”, Addison-Wesley Iberoamericana S.A., EUA, 304 (1986).
- [10].- D. Malacara, “Óptica Básica”, Fondo de Cultura Económica S.A. de C.V., México DF, Primera edición, 307 (1989).
- [11].-E. Swokoski, “Calculo con geometría analítica”, Grupo Editorial Iberoamericana, México, Segunda edición, (1988).
- [12].-C. González, Rafael, E. Woods, Richard, “Digital Image Processing”, Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 10 (1992).
- [13].-C. González, Rafael, E. Woods, Richard, “Digital Image Processing”, Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 14 (1992).
- [14].-C. González, Rafael, E. Woods, Richard, “Digital Image Processing”, Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 15 (1992).
- [15].-C. González, Rafael, E. Woods, Richard, “Digital Image Processing”, Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 116 (1992).

- [16].-C. González, Rafael, E. Woods, Richard, "Digital Image Processing", Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 17 (1992).
- [17].-C. González, Rafael, E. Woods, Richard, "Digital Image Processing", Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 171 (1992).
- [18].- S. Vazquez-Montiel, Tetsuya Susuki, Morio Hosaya, "FOCOIVA: a two dimensions scanners, R&D Center", Hoya Corporation, Tokyo, Japón. Por publicar.
- [19].- D. M. Gale, "Marco de metrología óptico para una máquina de medición por coordenadas", Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, 1-4 (1998).
- [20].-Osier, Bastónt Grobman, "Aprendiendo Delphi 3 en 14 días", SAMS publishing, (1998).
- [21].-H. Mauldin, "Luz, Láser y óptica", McGrawHill, (1992).
- [22].-Alveranga Álvarez, Beatriz. Ribeiro Da Luz, A. Máximo, "Física General con experimentos sencillos", Harper & Row Latinoamericana, (1983).
- [23].- D. Malacara, "Optical shop Testing, John Wiley and Sonds, New York, 8-20 (1978).
- [24].- Hecht, Zajac "Óptica", Addison-Wesley Iberoamericana S.A., EUA, (1986).
- [25].- D. Malacara, "Óptica Básica", Fondo de Cultura Económica S.A. de C.V., México DF, Primera edición, 307 (1989).
- [26].-C. González, Rafael, E. Woods, Richard, "Digital Image Processing", Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 10 (1992).
- [27].-C. González, Rafael, E. Woods, Richard, "Digital Image Processing", Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 15 (1992).

Apéndice I

I PROGRAMA PRINCIPAL

En este apéndice solo se encuentran los procedimientos mas importantes del sistema. Para consultar los procedimientos restantes consultar el código del programa que se encuentra en el CD.

Procedimiento abrir.

```
Abrir();
begin
  L.Enabled:=False;
  SB.Enabled:=False;
  Imagen.Visible:=True;
  if OpenFileDialog.Execute then
    begin
      Archivo := OpenFileDialog.FileName;
      Imagen.Picture.LoadFromFile(Archivo);
    end;
  F1.Caption:='Procesamiento Fizeau (' + Archivo+ ')';
  Analiza();
  Imagen1.Enabled:=True;
end;
```

Procedimiento guardar.

```
Guardar(Sender: TObject);
begin
  Image1.Picture:=F1.Imagen.Picture;
  Image1.Visible:=True;
  if OpenFileDialog.Execute then
    begin
      Archivo := OpenFileDialog.FileName;
      Image1.Picture.LoadFromFile(Archivo);
    end;
  Form1.Caption:='Ajustando (' + Archivo+ ')';
  Image1.Enabled:=True;
end;
```

Procedimiento convertir y línea.

```
for i:=1 to Temp.ColCount do
  F2.Temp1.Cells[i,0]:=IntToStr(i);
for i:=1 to Temp.RowCount do
  F2.Temp1.Cells[0,i]:=IntToStr(i);

F2.Caption:='Binarizando ('+ Archivo+ ')';
F2.Image1.Picture:=F1.Image11.Picture;
F2.Image1.Picture:=F1.Image11.Picture;

for j:=0 to Imagen.Height do
  for i:=0 to Imagen.Width do
    F2.Temp1.Cells[i+1,j+1]:=Temp1.Cells[i+1,j+1];
  F2.Image1.Visible:=True;

{//Convertir los datos a 255 de la matriz de
binarización.*****}
for j:=0 to Imagen.Height do
  for i:=0 to Imagen.Width do
    if (StrToInt(F2.Temp1.Cells[i+1,j+1]))=0 then
    else
      F2.Temp1.Cells[i+1,j+1]:='255';
```

Procedimiento graficar.

```
Graficar(Dato,Tipo:Integer);
var
  i:Integer;
begin
  G.Visible:=True;
  G.CleanupInstance;
  Series1.Active:=True;
  Series1.Clear;
  if Tipo=1 then
```

```

with Series1 do
begin
  for i:=1 to F1.Imagen.Width do
  begin
Add(StrToInt(Temp.Cells[i,Dato]),IntToStr(i),clRed);
    end;

  end;
if Tipo=2 then
  with Series1 do
  begin
    for i:=0 to F1.Imagen.Width do
    begin
Add(StrToInt(Temp.Cells[Dato,i+1]),IntToStr(i),clRed);
      end;

    end;
  G.CleanupInstance;
end;

```

Procedimiento binariza y obtener Resultado.

```

for j:=0 to Imagen.Height do
  for i:=0 to Imagen.Width do
  if
(StrToInt(Temp.Cells[i+1,j+1]))<StrToInt(F6.Umbra.Text)
then
  begin
    Temp1.Cells[i+1,j+1]:=IntToStr(0);
  end
  else
    Temp1.Cells[i+1,j+1]:=IntToStr(16777215);

```

```

for j:=0 to Imagen.Height do
  for i:=0 to Imagen.Width do

Image11.Canvas.Pixels[i,j]:=StrToInt(Temp1.Cells[i+1,j+1]);

```

Procedimiento calcula y obtener resultado.

```

Histograma(); ///Calcular el histograma
var
  i,j,k:Integer;
  x:Integer;
begin
  for i:=0 to 255 do
    F4.Histo.Cells[i,0]:=IntToStr(i);
  for i:=0 to 255 do
    F4.Histo.Cells[i,1]:=IntToStr(0);

  for j:=0 to Imagen.Height-1 do
    for i:=0 to Imagen.Width-1 do
    begin
      for k:=0 to 255 do
        if (StrToInt(F4.Temp2.Cells[i+1,j+1])=k) then
          F4.Histo.Cells[k,1]:=
            IntToStr(StrToInt(F4.Histo.Cells[k,1])+1);

        end;
      end;
    end;

```

Procedimiento calcula (Ajuste).

```

for j:=0 to Image1.Height-3 do
begin
  i:=0;

```

```

while (i<image1.Width-8) Do
Begin
  Z:=Temp1.Cells[i+1,j+1];
  X[1]:=i;
  Y[1]:=Z;
  Z:=0;

  Z:=Temp1.Cells[i+3,j+1];
  X[2]:=i+3;
  Y[2]:=Z;
  Z:=0;

  Z:=Temp1.Cells[i+5,j+1];
  X[3]:=i+4;
  Y[3]:=Z;

  Spline(X,Y,3,S);

  Ytest:=Yspline(X,Y,3,S,i+2);
  L:=Ytest;
  K:=Int(L);
  Temp1.Cells[i+2,j+1]:=IntToStr(K);

  Ytest:=Yspline(X,Y,3,S,i+4);
  L:=Ytest;
  K:=Int(L);
  Temp1.Cells[i+4,j+1]:=IntToStr(K);
  i:=i+2;
End;

```

Procedimiento obtener resultado (SPLIN).

```
Spline(X,Y:Vector;Np:Byte;Var S:Matriz);
```

```

Var
  L,H,Alfa,U,Z : Vector;
  N,I,J : Byte;

Begin
  N:=Np-1;
  S[1,Np]:=Y[Np];
  For I:=1 To N DO
    Begin
      H[I]:=X[I+1]-X[I];
      S[1,I]:=Y[I]

    End;
  For I:=2 To N Do
    Alfa[I]:=(3*(S[1,I+1]*H[I-1]-S[1,I]*(X[I+1]-X[I-1]))+S[1,I-1]*H[I])/(H[I-1]*H[I]);

    L[1]:=1; U[1]:=0; Z[1]:=0;
    For I:=2 To N Do
      Begin
        L[I]:=2*(X[I+1]-X[I-1])-H[I-1]*U[I-1];
        U[I]:=H[I]/L[I];
        Z[I]:=(Alfa[I]-H[I-1]*Z[I-1])/L[I];
      End;
    L[Np]:=1; Z[Np]:=0; S[3,Np]:=Z[Np];
    For I:=1 To N Do
      Begin
        J:=N-I+1;
        S[3,J]:=Z[J]-U[J]*S[3,J+1];
        S[2,J]:=(S[1,J+1]-S[1,J])/H[J]-
          H[J]*((S[3,J+1]+2*S[3,J])/3);
        S[4,J]:=(S[3,J+1]-S[3,J])/(3*H[J]);
      End;
    End;
End;

```

```

Function
Yspline(X,Y: Vector;Np:Byte;S:Matriz;Xtest:Real):Real;
Var I,J,K : Byte;
    Xs,Ys : Real;
    Encontrado : Boolean;
Begin
    Ys:=0; Encontrado:=False;
    If Xtest < X[1] Then
    Begin
        J:=2;
        Encontrado:=True;
    End
    Else
    For K:=2 To Np Do
        If X[K] > Xtest Then
        Begin
            If Not Encontrado Then J:=K;
            Encontrado:=True;
        End;
    If Not Encontrado Then J:=Np;
    Xs:=Xtest-X[J-1];
    For Ks=1 To 4 Do
        Begin
            I:=4-K;
            Ys:=Ys*Xs+S[I+1,J-1];
        End;
    Yspline:=Ys;
End;

```

Procedimiento calcular radio de curvatura y constante de conicidad.

```

procedure TForm2.Button1Click(Sender: TObject);
var
    res,i,k,x,x1,x2,x3,Y,Z: Variant;

```

```

    final,final: Variant;
begin
    Z:=Xn.text;
    x3:=Z*1;
    Z:=Xn_1.text;
    x2:=Z*1;
    Z:=Xn_2.text;
    x1:=Z*1;
    res:=1.000000000;
    k:=(2*x2*x2*res*res);
    k:=k-(x3*x3*res*res+x1*x1*res*res);
    k:=2*k;
    k:=k-(623.8e-9*623.8e-9);
    k:=k/(623.8e-9*623.8e-9);
    Y:=k;
    k1.text:=Y;
    final:=(x3*x3*res*res)-(x2*x2*res*res);
    final:=final-((k+1)*((623.8e-9*623.8e-9)/4));
    final:=power(final,2);
    final1:=(k+1)*(623.8e-9*623.8e-9);
    final1:=final1*x3*x3*res*res*623.8e-9*623.8e-9;
    final:=final+final1;
    final:=power(final,(1/2));
    final:=final/623.8e-9;
    Y:=final;
    r.Text:=Y;
end;

```

Apéndice II

MANUAL DE USUARIO

Este apéndice muestra una manera fácil y rápida como usar el software elaborado y que datos o teclas oprimir para continuar con la evaluación.

Descripción de los elementos de la ventana principal.

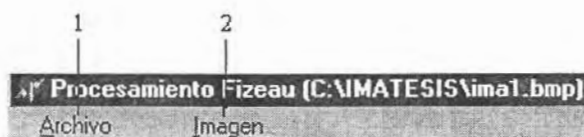


figura II.1. Elementos de la ventana principal

1. Para que usted pueda activar el menú **archivo** (Figura II.1, 1) de la ventana principal, haga clic con el botón izquierdo de su ratón (mouse), sobre la palabra artículo.
2. Si usted desea activar el menú **imagen** (Figura II.1, 1) de la ventana principal, primero tiene que activar el menú archivo y abrir una imagen, luego posicione el cursor del ratón (mouse), sobre la palabra imagen, y haga clic con el botón izquierdo del mismo.

Como usar el menú Archivo.

Este menú es el más importante, porque a partir de este se lee la imagen deseada, y se leen los datos de la imagen para poder ser procesados.

En el momento en que usted haga clic (con el botón izquierdo) con el cursor de su ratón sobre la palabra archivo, aparecerá el menú siguiente (figura II.2), en el cual podrá escoger tres opciones, abrir (1a), guardar (1b) y salir (1c).

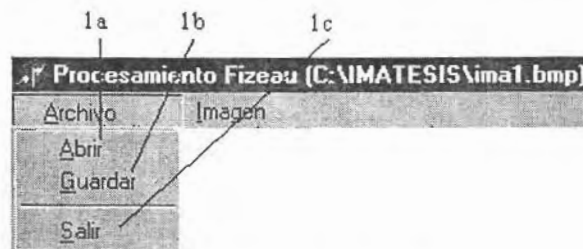


figura II.2. Elementos del menú Archivo.

Como usar el menú Imagen.

Este menú nos permite encontrar las distancias entre las franjas de los interferogramas, de tres maneras diferentes

En el momento en que usted haga click (con el botón izquierdo) con el cursor de su ratón sobre la palabra imagen, aparecerá el menú siguiente (figura II.3), en el cual podrá escoger tres opciones, binarizar (2a), Histograma (2b) y Ajuste (2c).



figura II.3. Elementos del menú Imagen.

La opción salir.

Esta opción, le permite a usted como usuario salir del sistema Dfizeau 1.0, si es que así lo desea.

Descripción de los elementos de la primera ventana Abrir (Figura II,4).

Usted podrá escribir la ruta completa del archivo a abrir (3), seleccionar el archivo (2), buscar el directorio deseado (1), Ver que tipos de archivos puede ver (6), tener una vista previa (5), y una vez que seleccione el archivo presione el botón abrir (4).

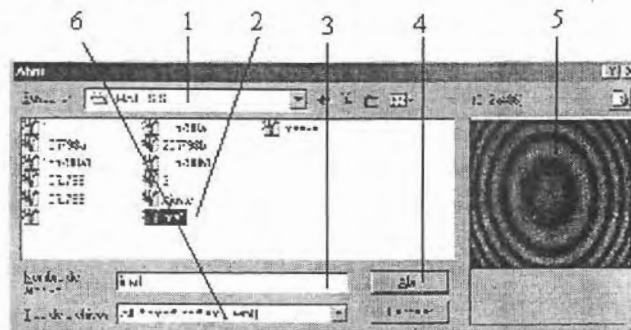


figura II.4. Elementos de la ventana abrir.

1. Ruta de búsqueda para el archivo de imagen.
2. Archivo seleccionado.
3. Nombre del archivo.
4. Abrir imagen.

5. vista previa del archivo.
6. Tipos de archivos disponibles para ser aceptados.

Descripción de los elementos de la segunda ventana Abrir.

En esta ventana (Figura II.5) usted podrá observar la imagen obtenida sin ninguna modificación. Podrá observar tanto su matriz de irradiancias, como su grafica de irradiancias, así como el interferograma a analizar.

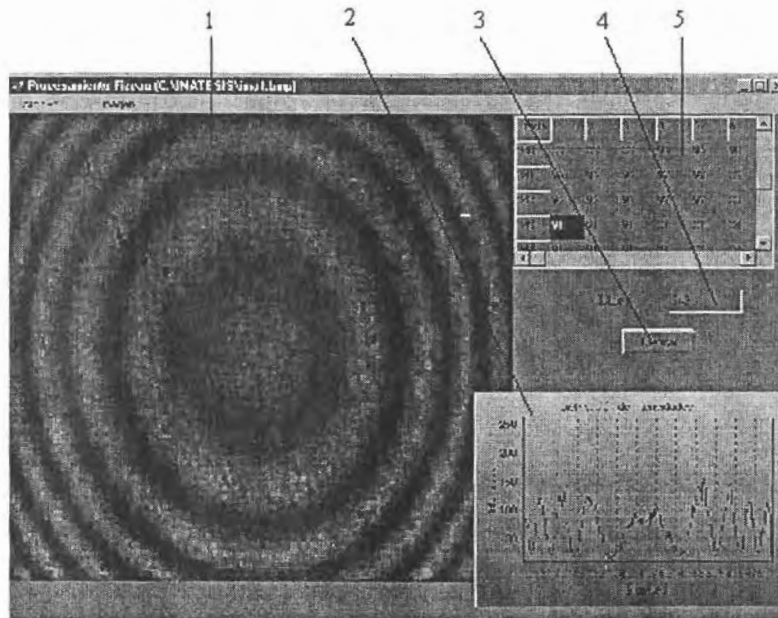


figura II.5. Elementos de la ventana abrir.

1. Imagen abierta.
2. Gráfica de la línea deseada.
3. Graficar la Línea deseada.
4. Línea a graficar.
5. Matriz de los tonos de gris de la imagen.

Como graficar una línea de barrido deseada.

1. Usted puede seleccionar una celda de la matriz de la imagen y luego pulsar la opción graficar.
2. Otra manera es escribir la línea que desee en el cuadro de la etiqueta **Línea**.

Como obtener resultados por Binarización.

En el momento en que usted haga click con el cursor de su ratón sobre la palabra Binariza, aparecerá una ventana en la cual usted escoge el umbral deseado para binarizar (figura II.6).

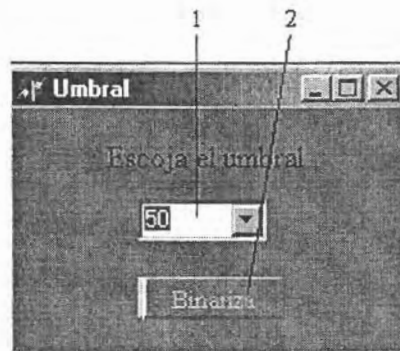


figura II.6. Ventana para escoger el umbral.

1. Escoja el umbral deseado.
2. Presione para Binarización.

Descripción de los elementos de la ventana Binarizando.

En esta ventana (Figura II.7) usted podrá observar la imagen binarizada (1). Podrá observar tanto su matriz de irradiancias ya binarizada (5), como su grafica de irradiancias binarizada (2).

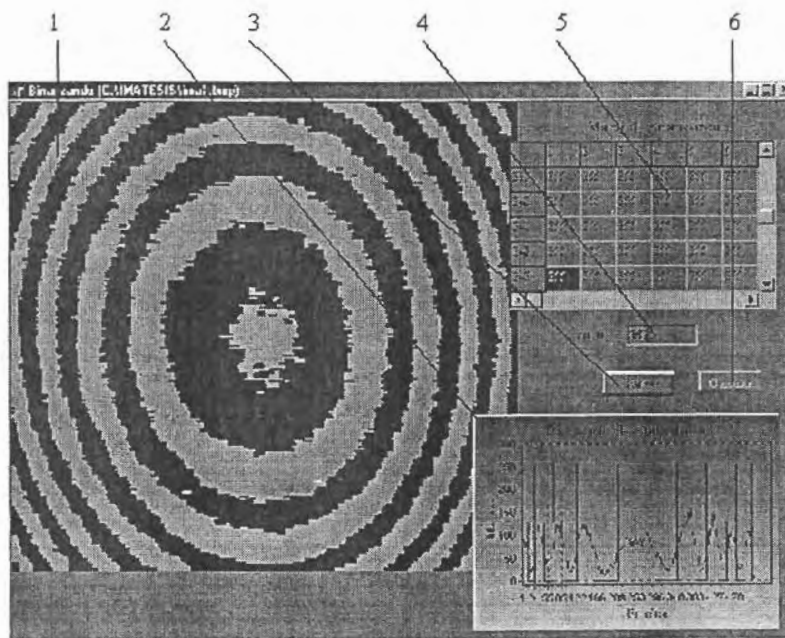


figura II.7. Elementos de la ventana Binarizando.

1. Imagen Binarizada.
2. Gráfica de la línea deseada..
3. Graficar la Línea deseada.
4. Línea a graficar.
5. Matriz de Binarización de la imagen..
6. Calcular constante de conicidad y radio de curvatura.

Descripción de los elementos de la ventana Por Histograma.

En esta ventana (Figura II.8) usted podrá observar el interferograma sin ninguna modificación (1). Podrá observar tanto su matriz de irradiancias (5), como la gráfica del histograma obtenido (2).

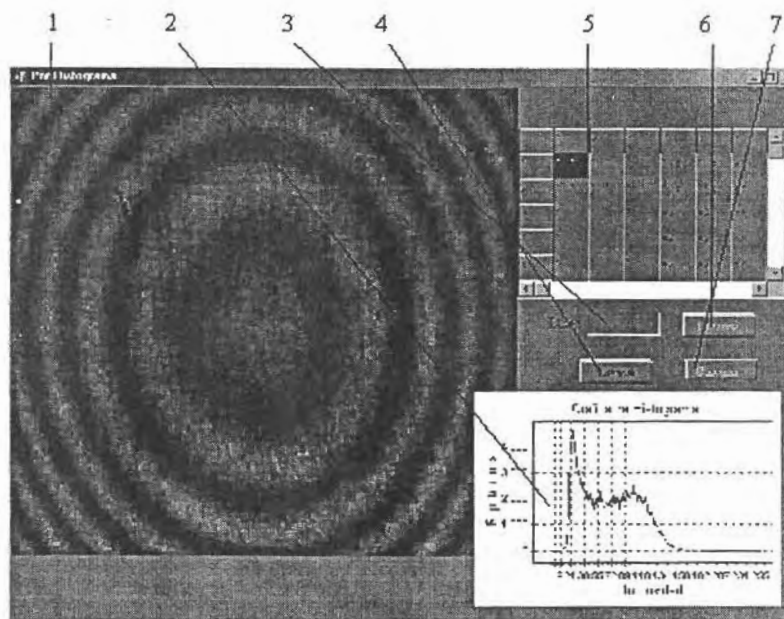


figura II.8. Elementos de al ventana Por Histograma.

1. Imagen Original.
2. Gráfica de la línea deseada..
3. Línea a graficar.
4. Graficar la Línea deseada.
5. Matriz de Binarización de la imagen..
6. Botón para binarizar con el umbral obtenido.
7. Calcular constante de conicidad y radio de curvatura (presionar una vez binarizado la imagen).

Una vez presionado el botón binariza (figura II.8), aparecerá la imagen binarizada, y podrá calcular la constante de conicidad y el radio de curvatura.

Como obtener resultados por Ajuste.

En el momento en que usted haga click con el cursor de su ratón sobre la palabra Ajuste, aparecerá una ventana (figura II.9), en la cual usted tiene que presionar el botón **ajustar** (II.9a).

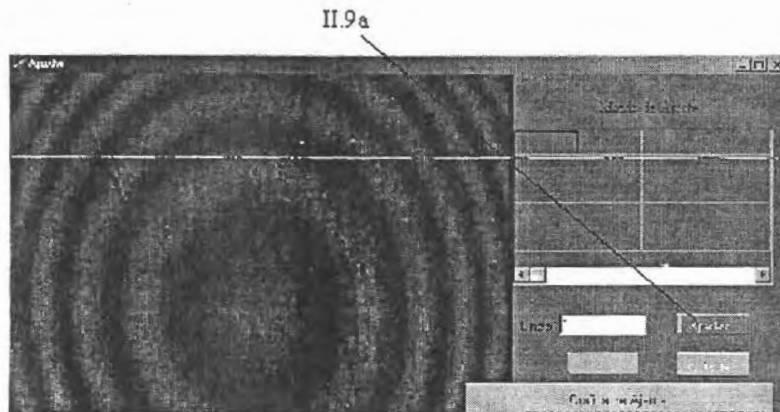


figura II.9. Ventana inicial de Ajuste.

Descripción de los elementos de la nueva ventana Ajuste.

En esta ventana (Figura II.10) usted podrá observar la imagen obtenida después del ajuste. Podrá observar tanto su matriz de irradiancias (5), como su grafica de irradiancias (2).

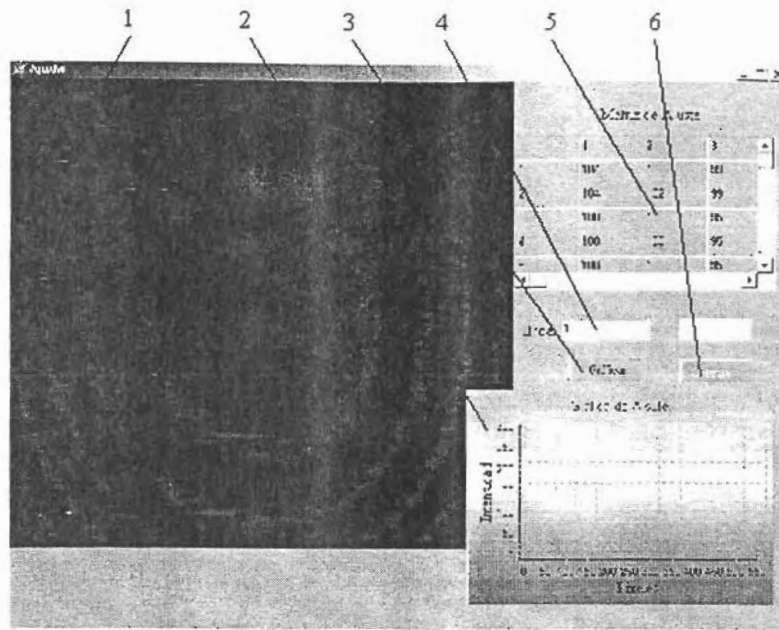


figura II.10. Elementos de al ventana Ajuste.

1. Imagen Ajustada.
2. Gráfica de la línea deseada..
3. Graficar la Línea deseada.
4. Línea a graficar.
5. Matriz de Ajuste de la imagen..
6. Calcular constante de conicidad y radio de curvatura.