

CENTRO DE INVESTIGACION CIENTIFICA Y  
DE EDUCACION SUPERIOR DE ENSENADA

DISEÑO DE UN INTERFEROMETRO ELECTRONICO  
DE PATRONES DE MOTEADO CON APLICACION  
A MOVIMIENTOS FUERA DE PLANO.

T E S I S  
MAESTRIA EN CIENCIAS

*Gerardo Antonio Castanon Avila*

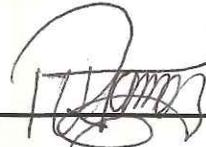
ENSENADA, BAJA CALIFORNIA, SEPTIEMBRE DE 1989.



**RESUMEN** de la Tesis de Gerardo Antonio Castañón Avila presentada como requisito parcial para la obtención del grado de **MAESTRO EN CIENCIAS** en Física Aplicada con especialidad en **OPTICA**. Ensenada, Baja California, México. Septiembre de 1989.

**DISEÑO DE UN INTERFEROMETRO ELECTRONICO DE PATRONES DE MOTEADO CON APLICACION A MOVIMIENTOS FUERA DE PLANO.**

Resumen aprobado por:



---

M. en C. Ricardo Villagómez T.  
Director de tesis.

En este trabajo se presenta un estudio teórico y experimental sobre el diseño de un interferómetro electrónico de patrones de moteado sensible a movimientos fuera de plano, con el haz de referencia suavizado.

El estudio teórico para este interferómetro, parte desde la teoría de interferencia entre dos haces. La ecuación básica que se utiliza, es la ecuación de interferencia entre dos haces. Esta ecuación lleva en el término de interferencia, el desfazamiento que existe entre los dos haces. Este patrón de interferencia es captado por el detector de una cámara de televisión de una buena resolución. Para que la cámara alcance a captar la interferencia entre dos haces, se discute la posición que debe tener el haz de referencia. La imagen captada por la cámara de televisión, es digitalizada y guardada en una matriz de 512 x 512 elementos de imagen.

Al tener dos imágenes del mismo objeto, antes y después de moverse y al correlacionar punto por punto estas dos imágenes, se obtiene un patrón de franjas que puede dar información de cuanto se ha desplazado el objeto. En este trabajo se utiliza procesamiento digital de imágenes, con el cual se obtienen interferogramas de muy buen contraste.

El análisis experimental se realiza para objetos con superficie difusora. Se utilizan objetos rígidos y también objetos capaces de sufrir deformaciones en su superficie.

En la parte experimental de este trabajo se presentan interferogramas los cuales, indican, por el número de franjas, el desplazamiento que ha sufrido el objeto en el orden de micras. Dependiendo del tipo de movimiento fuera de plano, es posible cuantificar la magnitud y la forma en que se desplazó el objeto.

Los experimentos sobre desplazamientos fuera de plano, fueron

realizados y verificados. Los resultados que se obtienen sobre la cantidad que se desplaza el objeto y la calidad de los interferogramas obtenidos es satisfactoria.

TESIS DEFENDIDA POR: GERARDO ANTONIO CASTAÑON AVILA

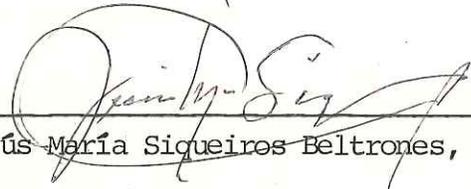
Y APROBADA POR EL SIGUIENTE COMITE DE TESIS:



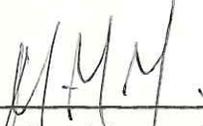
M.C. Ricardo Villagómez Tamez, Director del Comité



M.C. Ricardo Contreras Jara, Miembro del Comité



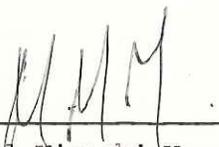
Dr. Jesús María Siqueiros Beltrones, Miembro del Comité



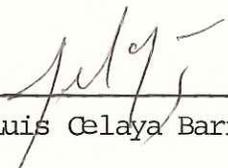
M.C. Manuel Kiyosni Yamada Shinoda, Miembro del Comité



M.C. Homero Rafael Cabrera Muro, Miembro del Comité



M.C. Manuel Kiyoshi Yamada Shinoda, Jefe del Departamento de Optica



Dr. Martín Luis Celaya Barraquán, Director de la División de Física Aplicada



Dr. Héctor Echavarría Heras, Director Académico Interino

Septiembre 18, 1989

**CENTRO DE INVESTIGACION CIENTIFICA Y DE EDUCACION  
SUPERIOR DE ENSENADA.**

**DIVISION DE FISICA APLICADA  
DEPARTAMENTO DE OPTICA**

**DISEÑO DE UN INTERFEROMETRO ELECTRONICO DE PATRONES  
DE MOTEADO CON APLICACION A MOVIMIENTOS FUERA DE  
PLANO.**

**T E S I S**

**que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para  
obtener el grado de MAESTRO EN CIENCIAS presenta:**

**GERARDO ANTONIO CASTAÑON AVILA**

**Ensenada, Baja California, Septiembre de 1989.**

DEDICATORIA

*a mis padres :*

*María de los Dolores y*

*Pablo Castañón B.*

## AGRADECIMIENTOS

A mi director de tesis M. en C. Ricardo Villagómez T. y a mi asesor M. en I. Ricardo Contreras J. por el apoyo que me brindaron en el desarrollo de este trabajo.

A los miembros del comité de tesis Dr. Jesús Siqueiros, M. en I. Ricardo Contreras J. M. en C. Manuel Yamada, por la revisión y crítica de mi trabajo.

A mis maestros y personal de laboratorio de Física del ITESM y personal de la División de Física Aplicada del CICESE que de alguna forma contribuyó para la realización de mis estudios.

Al Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada B.C., al Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.

## CONTENIDO

	Página.
I INTRODUCCION.	1
II PRINCIPIOS BASICOS	4
II.1 Introducción.	4
II.2 Efecto de moteado.	4
II.3 Frecuencia espacial.	5
II.4 Transformada de Fourier por lentes.	8
II.5 Consideración de la abertura finita de la lente.	11
II.6 Respuesta al impulso por una lente positiva.	12
II.7 Imagen de una superficie iluminada por un Láser.	15
II.8 Interferencia entre dos frentes de onda planos.	17
II.9 Coeficientes de correlación en la correlación de dos patrones de moteado.	19
III DESCRIPCION DEL INTERFEROMETRO ELECTRONICO DE PATRONES DE MOTEADO.	22
III.1 Introducción.	22
III.2 Sistema de video.	23
III.3 Sistema de adquisición y correlación de imágenes.	25
III.4 Arreglos ópticos para el Interferómetro Electrónico de Patrones de Moteado.	27
III.4.1 Sistema de haz de referencia suavizado.	28
III.4.2 Interferómetros sensibles a desplazamientos en el plano.	30
III.5 Interferómetro sensible a desplazamientos fuera de plano con el haz de referencia suavizado.	32

CONTENIDO (Continuación)		Página.
III.6	Principio de formación de franjas por correlación de patrones de moteado.	36
III.7	Formación de franjas por correlación de intensidad usando sustracción de imágenes.	39
III.7.1	Formación de franjas por correlación de intensidad usando suma de imágenes.	41
III.8	Observación de desplazamientos dinámicos usando correlación de patrones de moteado.	42
III.9	Gradientes de desplazamiento para interferómetros sensibles a desplazamientos fuera del plano.	45
III.10	Gradientes de desplazamiento para interferómetros sensibles a desplazamientos en el plano.	50
IV	CARACTERISTICA DEL SISTEMA DE ADQUISICION DE IMAGENES.	54
IV.1	Introducción.	54
IV.2	Sistema de video.	54
IV.3	Resolución espacial del sistema de video y el efecto en la correlación de patrones de moteado.	55
IV.3.1	Resolución espacial de un interferómetro con los dos haces de moteado.	58
IV.3.2	Resolución espacial de un sistema con el haz de referencia suavizado.	59
IV.4	Consideraciones sobre la intensidad de la luz en el interferómetro electrónico de patrones de moteado.	63
IV.4.1	Restricciones impuestas por el rango dinámico de la cámara.	63
IV.4.2	Resta de imágenes cuando los dos haces son patrones de moteado.	65
IV.4.3	Resta de imágenes cuando el haz de referencia es suavizado.	66

CONTENIDO (Continuación)		Página.
IV.4.4	Suma de imágenes cuando los dos haces son patrones de moteado.	67
IV.4.5	Suma de imágenes con el haz de referencia suavizado.	68
IV.5	Consideraciones sobre el sistema de video.	69
IV.6	Características del sistema digitalizador de imágenes.	72
IV.6.1	Característica de la tarjeta DT2851.	73
IV.6.2	Arquitectura y principios de programación.	76
V	RESULTADOS EXPERIMENTALES	79
V.1	Introducción.	79
V.2	Descripción del sistema óptico para la observación del desplazamiento fuera de plano.	79
V.3	Medidas de desplazamiento fuera del plano.	84
V.3.1	Imágenes obtenidas para movimientos fuera del plano con procesamiento digital.	85
V.3.2	Imágenes obtenidas para movimientos fuera del plano con desplazamiento giratorio horizontal.	89
V.3.3	Imágenes obtenidas para movimientos fuera del plano con desplazamiento giratorio vertical.	92
V.3.4	Observación de desplazamientos fuera del plano para una membrana vibrante.	95
V.4	Listados de programas.	98
VI	CONCLUSIONES.	101
	LITERATURA CITADA.	104

## LISTA DE FIGURAS

Figura		Página.
1	Imagen de un patrón de moteado formado por una superficie iluminada por un láser.	4
2	Representación de la máxima frecuencia espacial para la cual la intensidad en el plano imagen representa el módulo cuadrado del espectro objeto de Fourier.	6
3	Frecuencias para las cuales el espectro de Fourier desaparece.	7
4	Objeto colocado frente a la lente (alejado de ella).	8
5	Geometría de la abertura finita de la lente para la formación de imágenes.	11
6	Geometría de formación de imágenes.	12
7	Sistema óptico formador de imágenes.	16
8	Interferencia de dos frentes de onda plana.	18
9	Sistema de adquisición y correlación de imágenes.	25
10	Representación esquemática del procesamiento digital de la imagen resultante (con franjas de correlación).	27
11	Interferómetro con haz de referencia suavizado.	29
12	Interferómetro sensible a movimientos en el plano.	30
13	Arreglo alternativo sensible a movimientos en el plano.	31
14	Interferómetro sensible a movimientos fuera del plano con el haz de referencia suavizado.	32
15	Interferómetro sensible a desplazamientos fuera del plano con los dos haces de moteado.	36
16	Arreglo óptico para la correlación de patrones de moteado sensible a movimientos fuera del plano.	42
17	Interferómetro de correlación de patrones de moteado para la detección visual de modos de vibración de tiempo promedio.	43

## LISTA DE FIGURAS (Continuación)

figura		Página.
18	Arreglo óptico con el haz de referencia suavizado sensible a desplazamientos fuera del plano.	46
19	Arreglo óptico sensible a movimientos fuera del plano.	47
20	Imagen del objeto, con un corrimiento de $S_2$ .	48
21	Interferómetro sensible a movimientos en el plano.	51
22	Interferómetro con el haz de referencia suavizado.	60
23	Proceso de adquisición y correlación de imágenes.	72
24	Diagrama de bloques de la tarjeta digitalizadora.	75
25	Arreglo del interferómetro electrónico de patrones de moteado utilizado en el desarrollo de este trabajo.	80
26	Fotografía del interferómetro utilizado en el desarrollo de este trabajo.	81
27	Computadora IBM AT y monitor de televisión usados en este proyecto.	82
28	Representación esquemática del procesamiento digital de la imagen resultante(con franjas de correlación).	83
29	Patrones de franjas por correlación de intensidad para movimientos de objeto fuera de plano sometidos a un realce de contraste arbitrario, haciendo blanco desde el nivel 10 de intensidad digital.	88
30	Patrones de franjas por correlación de intensidad para movimientos de objeto fuera de plano con desplazamiento giratorio horizontal, sometidos a un realce de contraste arbitrario, haciendo blanco desde el nivel 10 de intensidad digital.	91
31	Patrones de franjas por correlación de intensidad para movimientos de objeto fuera de plano con desplazamiento giratorio vertical, sometidos a un realce de contraste arbitrario, haciendo blanco desde el nivel 10 de intensidad digital.	94

### LISTA DE FIGURAS (Continuación)

Figura		Página.
32	Patrones de franjas por correlación de intensidad para movimientos de objeto fuera de plano de una membrana vibrante a 0.5Hz, sometidos a un realce de contraste arbitrario.	97

### LISTA DE TABLAS

Tabla		Pagina.
1	Intensidades de luz de saturación y sensibilidades de tubos de televisión.	70

### LISTA DE PROGRAMAS

Listado		Página.
1	Este programa toma dos imágenes en 1/30 de segundo, esperando 5 seg. entre cada imagen, después hace una resta de las dos imágenes.	98
2	Este programa hace un realce de contraste arbitrario, toma del rango [10, 255] de intensidad digital igual a 255 que corresponde a un blanco, y el rango [0, 9] igual a 0 que corresponde a un negro.	98
3	Este programa toma cada imagen en 1/30 de seg. y después se restan.	99
4	Este programa toma cada imagen en 1/30 de seg. y se espera 1 seg. entre cada imagen, después se restan.	99
5	Este programa toma cada imagen en 1/30 de seg. y se espera 2 seg. entre cada imagen, después se restan.	100
6	Este programa hace un realce de contraste arbitrario, toma del rango [13, 255] de intensidad digital igual a 255 que corresponde a un blanco, y el rango [0, 12] igual a 0 que corresponde a un negro.	100

## INTERFEROMETRO ELECTRONICO DE PATRONES DE MOTEADO CON APLICACION A MOVIMIENTOS FUERA DE PLANO.

### I INTRODUCCION.

El Interferómetro Electrónico de Patrones de Moteado (Speckle en inglés) usa una cámara de televisión para detectar la distribución de intensidad de un patrón de moteado. La señal de video debe ser electrónicamente digitalizada y guardada en memoria, de tal manera que se estén creando por lo menos dos imágenes digitales, posteriormente estas dos imágenes se deben de correlacionar punto por punto y la imagen obtenida debe ser desplegada en un monitor de video en forma de un patrón de franjas. La correlación se hace entre una imagen almacenada en memoria antes del movimiento o deformación del objeto y la otra imagen, después del movimiento del objeto. La imagen del patrón de franjas que se obtiene después de correlacionar las dos imágenes, puede representar desplazamientos fuera de plano, modos de vibración y deformaciones.

La gran ventaja del ESPI (por sus siglas en inglés de Electronic Speckle Pattern Correlation Interferometry), es que facilita el despliegue de franjas por correlación de intensidad de patrones de moteado, indicando el movimiento del objeto analizado, en un tiempo real y despliega el patrón de franjas en un monitor de televisión sin tener que recurrir a procesamientos fotográficos. El sistema ESPI es comparativamente fácil de usar y su aplicación se ha extendido a problemas más complejos como medición de formas, deformaciones y análisis de vibraciones.

Otra de las ventajas con que cuenta el ESPI, presentado en este trabajo, es que a la imagen resultante (con franjas de correlación) se le puede hacer un procesamiento digital punto por punto en varias formas. Se puede hacer, además un procesamiento de contraste lineal, realce de contraste arbitrario y posteriormente convertir la señal digital a analógica de tal manera que sea la señal de entrada a un monitor de televisión. Con este tipo de procesamiento se puede obtener una imagen resultante (con franjas de correlación) de mejor contraste.

En este trabajo se presentan los principales aspectos en que se basa un interferómetro electrónico de patrones de moteado, así como el sistema de adquisición y correlación de imágenes.

Para llevar a cabo lo anterior, en el primer capítulo se presentan los conceptos principales en que se basa el interferómetro electrónico. Estos conceptos son: la consideración del efecto de moteado, frecuencia espacial, la obtención de la transformada de Fourier por lentes, la respuesta al impulso de una lente positiva, la imagen de una superficie iluminada por un haz láser, el concepto de interferencia entre dos haces y por último los coeficientes de correlación en la correlación de dos patrones de moteado.

En el segundo capítulo se presenta la descripción del interferómetro electrónico de patrones de moteado. Aquí se describen los diferentes tipos de arreglos ópticos que pueden ser usados para el interferómetro. También se hace un análisis de la interferencia de patrones de moteado cuando el haz de referencia es suavizado, se presenta un análisis de formación de franjas por correlación de intensidad, por último, se hace la deducción de los gradientes de desplazamiento para un sistema óptico cuando el haz de referencia es suavizado

para movimientos en eje y fuera de eje.

En el tercer capítulo se presentan las características principales del sistema de adquisición de imágenes; se presentan los tipos de cámaras de televisión que se pueden utilizar y se dan las características de la tarjeta digitalizadora de imágenes utilizada en este trabajo.

En el cuarto capítulo se presentan los resultados experimentales, para esto se muestra el sistema óptico que se utilizó en la obtención de franjas de correlación para desplazamientos fuera de plano y vibraciones; después, se presentan los parámetros limitantes de resolución del sistema. Por último, se presentan las imágenes con franjas por correlación de intensidad obtenidas para movimientos fuera de plano y vibraciones.

## II PRINCIPIOS BASICOS.

### II.1 Introducc3n.

En este cap3tulo se presentan los conceptos b3sicos en que se basa el interfer3metro electr3nico de patrones de moteado. Estos conceptos son: el efecto de moteado, la frecuencia espacial, la obtenci3n de transformada de Fourier por lentes, la imagen de una superficie iluminada por un l3ser, el concepto de interferencia de dos haces y por 3ltimo los coeficientes de correlaci3n en la correlaci3n de dos patrones de moteado.

### II.2 Efecto de moteado.

Cualquier persona que ha visto una superficie iluminada por un haz l3ser ha observado una curiosa apariencia granular de la superficie. Este efecto es conocido como efecto de moteado. La figura 1, muestra el patr3n de moteado al iluminar un objeto difusor.



figura 1. Imagen de un patr3n de moteado formado por una superficie iluminada por un l3ser.

El efecto de moteado ocurre solamente cuando la superficie es ópticamente rugosa y las variaciones de la superficie son del orden o más grandes que la longitud de la luz que la ilumina.

La forma de visualizar este efecto es considerar la superficie iluminada, como un conjunto de fuentes puntuales con orientaciones y frecuencias aleatorias.

La amplitud compleja de la luz sobre la superficie del objeto presenta sólo variaciones de fase, mientras que en cualquier otro plano del campo se tendrán fluctuaciones tanto en fase como en amplitud en función de las coordenadas espaciales. Esto se debe a la interferencia de los frentes de onda difractados por la superficie del objeto, con direcciones aleatorias.

La amplitud compleja  $a$  en cualquier punto, es la suma de las amplitudes complejas de todas las ondas interfiriendo, de modo que se tiene.

$$a = a_1 + a_2 + a_3 + a_4 + \dots \quad (1)$$

### II.3 Frecuencia espacial.

Para analizar este concepto, pensemos que tenemos una función objeto  $U_0$ , limitada por una abertura circular de diámetro  $D$ , y se pone en el plano focal frontal de una lente circular convergente de diámetro  $L$  como se muestra en la figura 2. La distribución de intensidad se mide en el plano focal posterior de la lente, como lo muestra la figura 2.

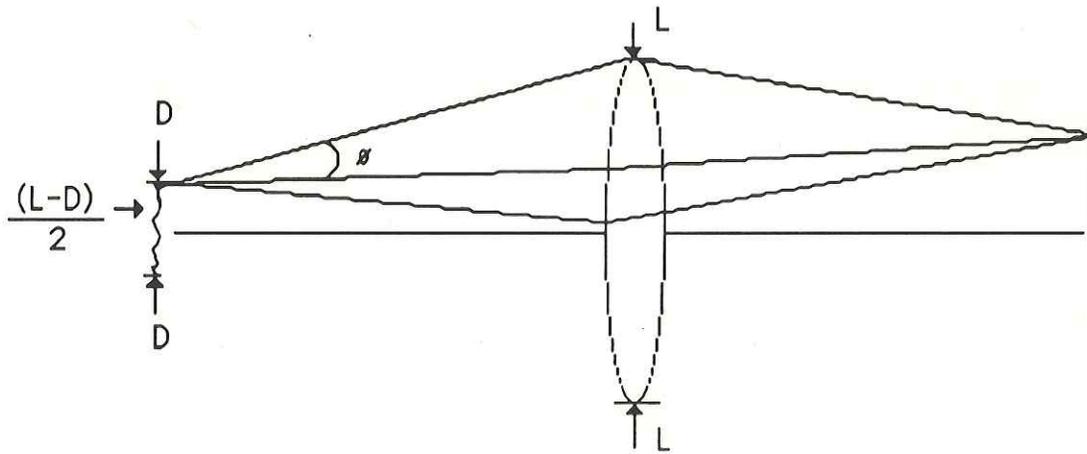


figura 2. Representación de la máxima frecuencia espacial para la cual la intensidad en el plano imagen representa el módulo cuadrado del espectro de Fourier del objeto.

La máxima frecuencia espacial para la cual la intensidad medida representa adecuadamente el módulo cuadrado del espectro objeto de Fourier esta dado por:

$$f_x = \sin\theta/\lambda \quad (2)$$

donde

$$\sin\theta = (L-D)/2\sqrt{((L-D)/2)^2 + f^2} \quad (3)$$

$f$  es la distancia focal de la lente, entonces se tiene que:

$$f_x = (L - D)/(\lambda \sqrt{(L-D)^2 + (2f)^2}) \quad (4)$$

La frecuencia a la cual el espectro desaparece, a pesar del hecho que el objeto pueda tener alguna componente de Fourier cero en las frecuencias más altas, es dada por la siguiente expresión.

$$f_x = \sin \phi_{\max} / \lambda \quad (5)$$

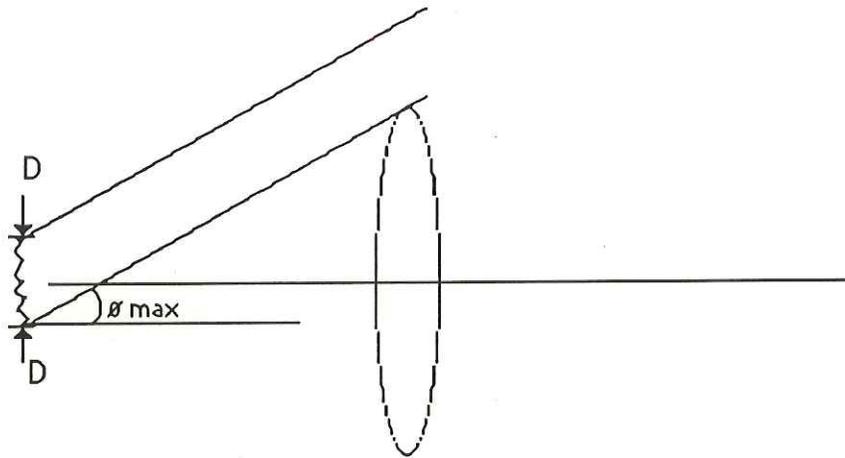


Figura 3. frecuencias para las cuales el espectro de Fourier desaparece.

considerando el ángulo máximo dado por:

$$\sin \phi_{\max} = (L+D) / \sqrt{(L+D)^2 + (2f)^2} \quad (6)$$

Con lo anterior se tiene que la frecuencia máxima es.

$$f_x = (L+D) / (\lambda \sqrt{(L+D)^2 + (2f)^2}) \quad (7)$$

#### II.4 Transformada de Fourier por lentes.

Una de las propiedades principales de una lente convergente es la capacidad de obtener la transformada de Fourier en dos dimensiones. Su operación puede ser ejecutada con extrema simplicidad por un sistema óptico coherente y obtenerla a la velocidad de la luz.

En el material que sigue se presenta una configuración que hace la operación de transformación. En este caso la iluminación se asume monocromática y la distribución de la amplitud de la luz atraviesa el plano focal posterior (Goodman, 1968). La figura 4. ilustra la configuración.

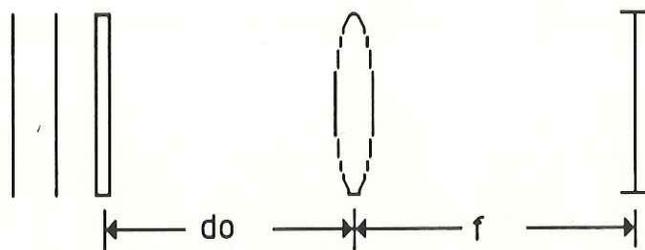


Figura 4. Objeto colocado frente a la lente (alejado de ella).

Para analizar este sistema se consideran los siguientes parámetros

$t_O(x,y)$  transmitancia de amplitud del objeto, y

$A$  es la amplitud de la onda plana monocromática incidente.

La perturbación incidente sobre la lente es dada por:

$$U_I(x,y) = A t_O(x,y) \quad (8)$$

también se introduce una función de pupila  $P(x,y)$  para tener en cuenta el hecho de que la abertura de la lente es finita.  $P(x,y)$  se define como.

$$P(x,y) = \begin{cases} 1 & \text{dentro de la abertura} \\ 0 & \text{fuera de ésta} \end{cases} \quad (9)$$

La transformación de fase producida por la lente, está dada por la siguiente ecuación

$$t_1(x,y) = \exp(iK_n \Delta_0) \exp\left(-\frac{ik}{2f}(x^2 + y^2)\right) \quad (10)$$

donde  $K_n \Delta_0$  es una constante de fase introducida por la lente, en la cual  $\Delta_0$  es el ancho de la lente en el eje del sistema. Sea  $F_0(f_x, f_y)$  el espectro de Fourier de la luz transmitida por el objeto y  $F_1(f_x, f_y)$  el espectro de Fourier de la luz incidente sobre la lente, tenemos que:

$$F_0(f_x, f_y) = F [At_0(x,y)] \quad (11)$$

$$F_1(f_x, f_y) = F [U_1] \quad (12)$$

entonces.

$$F_1(f_x, f_y) = F_0(f_x, f_y) \exp(-i\pi\lambda d_0(f_x^2 + f_y^2)) \quad (13)$$

En la aproximación de Fresnel, donde se omite el factor de constante de fase. La amplitud compleja detrás de la lente, está dada por la siguiente ecuación:

$$U_1'(x,y) = U_1(x,y) P(x,y) \exp\left(-\frac{ik}{2f}(x^2 + y^2)\right) \quad (14)$$

ignorando el factor de constante de fase.

En la aproximación de Fresnel el campo  $U_f(x_f, y_f)$  en el plano focal de la lente, puede expresarse en términos del campo  $U_1'(x,y)$  detrás de la lente y junto a ésta por.

$$U_f(x_f, y_f) = \frac{1}{i\lambda f} \iint_{-\infty}^{\infty} U_1'(x,y) \exp\left(\frac{ik}{2f}[(x-x_f)^2 + (y-y_f)^2]\right) dx dy \quad (15)$$

Sustituyendo  $U_1'(x,y)$  y simplificando se obtiene la siguiente ecuación tenemos:

$$U_f(x_f, y_f) = \frac{e^{ik(x_f^2 + y_f^2)/2f}}{i\lambda f} \iint_{-\infty}^{\infty} U_1(x,y) P(x,y) \exp\left(-\frac{i2\pi}{\lambda f}(x_f x + y_f y)\right) dx dy \quad (16)$$

si suponemos que  $(P(x,y)=1)$ , se tiene que es la integral de Fourier de  $U_1(x,y)$  y nos queda

$$U_f(x_f, y_f) = \left(\exp(ik(x_f^2 + y_f^2)/2f)/i\lambda f\right) F_1(x_f/\lambda f, y_f/\lambda f) \quad (17)$$

sustituyendo  $F_1(x_f/\lambda_f, y_f/\lambda_f)$  tenemos que:

$$U(x_f, y_f) = \exp(ik(1 - d_o/f)(x_f^2 + y_f^2)/2f) / i\lambda_f F(x_f/\lambda_f, y_f/\lambda_f) \quad (18)$$

La amplitud y fase de la luz en las coordenadas  $(x_f, y_f)$  está de nuevo relacionada con la amplitud y fase del espectro del objeto en las frecuencias  $(x_f/\lambda_f, y_f/\lambda_f)$ .

Cuando el objeto es colocado en el plano focal frente a la lente el término de fase desaparece, dejando una relación de transformada de Fourier exacta (Collier, 1971).

## II.5 Consideración de la abertura finita de la lente.

Para hacer esta consideración tomaremos en cuenta la figura 5.

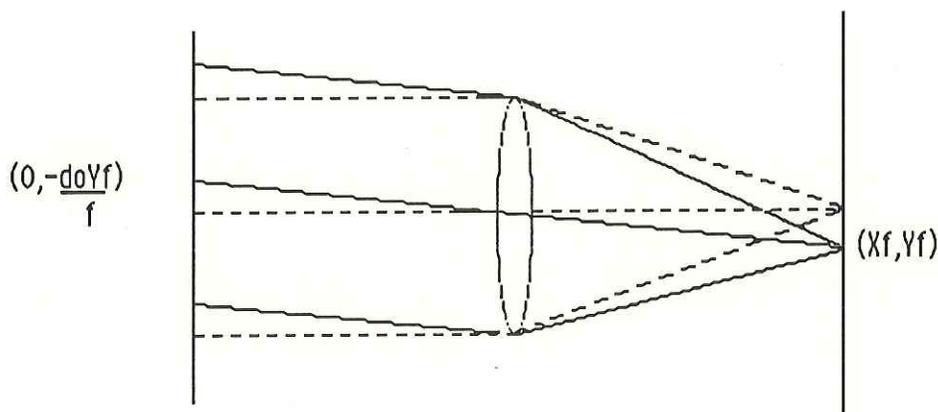


Figura 5. Geometría de la abertura finita de la lente para la formación de imágenes.

La extensión finita de la abertura de la lente puede ser tomada en cuenta proyectando esta abertura hacia atrás sobre el plano del objeto centrado la proyección sobre la línea que une el centro de la lente con el punto  $(x_f, y_f)$ .

El valor de  $U_f(x_f, y_f)$  en  $(x_f, y_f)$  puede ser encontrado de la transformada de Fourier de la porción del objeto contenida dentro de la región subtendida por la función de pupila  $P(x, y)$  centrada en las coordenadas  $(x_o = -d_o x_f / f, y_o = -d_o y_f / f)$  por lo tanto.

$$U(x_f, y_f) = \frac{A e^{\frac{ik}{2f} (1 - \frac{d_o}{f})(x_f^2 + y_f^2)}}{i k f} \iint_{-\infty}^{\infty} t_o(x_o, y_o) P(x_o + \frac{d_o}{f} x_f, y_o + \frac{d_o}{f} y_f) e^{-\frac{i2\pi}{\lambda f} (x_f x_o + y_f y_o)} dx_o dy_o \quad (19)$$

## II.6 Respuesta al impulso para una lente positiva.

Para hacer el análisis de este tema se hace uso de la figura 6.

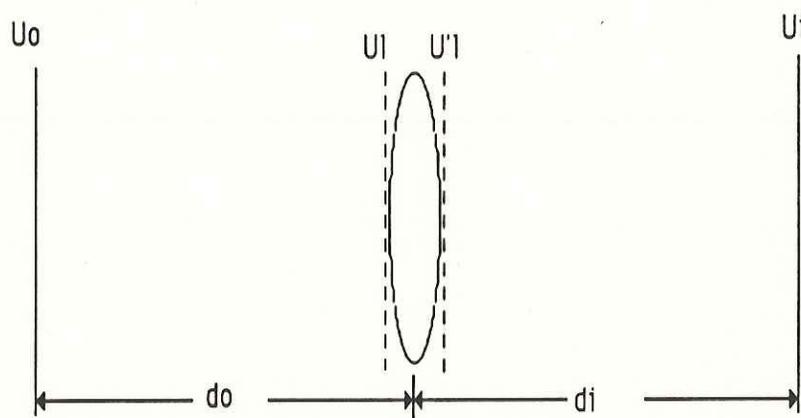


Figura 6. Geometría de formación de imágenes.

La distribución de amplitud compleja está dada por la siguiente ecuación.

$$U_i(x_i, y_i) = \iint_{-\infty}^{\infty} h(x_i, y_i; x_o, y_o) U_o(x_o, y_o) dx_o dy_o \quad (20)$$

Para que la imagen sea una reproducción aproximada al objeto se quiere que:

$$h(x_i, y_i; x_o, y_o) \approx K \delta(x_i - Mx_o; y_i - My_o) \quad (21)$$

donde  $K$  es una constante compleja y  $M$  es la amplificación del sistema.

Considerando una fuente puntual situada en un punto  $(x_o, y_o)$  del objeto en la aproximación paraxial, la distribución de amplitud compleja sobre la lente será:

$$U_l(x, y) = (1/i\lambda d_o) \exp(ik[(x-x_o)^2 + (y-y_o)^2]/2d_o) \quad (22)$$

después de la lente se tiene la siguiente distribución de amplitud compleja:

$$U_l' = U_l(x, y) P(x, y) \exp(-ik(x^2 + y^2)) \quad (23)$$

a una distancia  $d_i$  después de la lente se tiene que la función de respuesta al impulso esta dada como:

$$h(x_i, y_i; x_0, y_0) = \frac{1}{i\lambda d_i} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} U_1(x, y) e^{\frac{ik}{2d_i} [(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2]} dx dy \quad (24)$$

ahora, haciendo la sustitución de la ecuación (23) y considerando que:

$$M = x_i/x_0 = y_i/y_0, \text{ y además } 1/d_0 + 1/d_i - 1/f = 0$$

entonces

$$h(x_i, y_i; x_0, y_0) = \frac{1}{\lambda^2 d_i d_0} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} P(x, y) e^{-\frac{i2\pi}{\lambda d_i} [(x_i + Mx_0)x + (y_i + My_0)y]} d\tilde{x} d\tilde{y} \quad (25)$$

Cuando se satisface la ecuación de la lente, la función de respuesta al impulso está dado por el patrón de difracción de Fraunhofer de la abertura de la lente centrado en las coordenadas:

$$(x_i = -Mx_0, y_i = -My_0)$$

y haciendo un cambio de variable en la integral anterior se tiene que:

$$\tilde{x} = \frac{x}{\lambda d_i}, \quad \tilde{y} = \frac{y}{\lambda d_i}$$

la función de respuesta al impulso es.

$$h(x_i, y_i; x_o, y_o) = M \int \int P(\lambda d_j, \tilde{x}, \lambda d_j, \tilde{y}) e^{-i2\pi[(x_i + Mx_o)\tilde{x} + (y_i + My_o)\tilde{y}]} d\tilde{x} d\tilde{y} \quad (26)$$

Haciendo  $\lambda = 0$  se obtiene la aproximación de la óptica geométrica:

$$h(x_i, y_i; x_o, y_o) = 1/M \delta(x_i/M + x_o, y_i/M + y_o) \quad (27)$$

y sustituyendo este término en la integral de superposición (20), se tiene que:

$$U_i(x_i, y_i) = 1/M U_o(-x_i/M, -y_i/M) \quad (28)$$

entonces la integral predicha por la óptica geométrica es una réplica exacta del objeto, amplificada e invertida en el plano imagen.

## II.7 Imagen de una superficie iluminada por un láser.

Cuando un objeto es iluminado por una haz láser, la intensidad de la imagen varía aleatoriamente tanto en fase como en amplitud. La distribución espacial del moteado esta determinado por los límites de resolución del sistema formador de imagen.

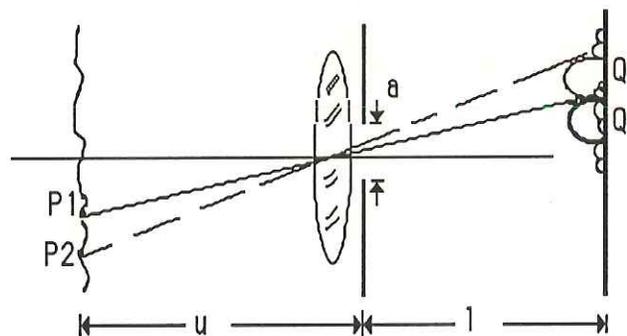


Figura 7. Sistema óptico formador de imágenes

De la figura 7, el punto P1 en el objeto, forma un patrón de difracción centrado en el punto Q. La distribución de amplitud es de la forma:

$$U(P) = A_0 \exp(2\pi i l \cos \theta / \lambda) [J_1(\pi b \sin \theta / \lambda) / (\pi b \sin \theta / \lambda)] \quad (29)$$

donde  $b$  es el diámetro de la mota y  $l$  la distancia de la lente al plano imagen.

El punto Q es iluminado por un punto adyacente a  $P_1$  proveniente del punto  $P_2$ , este punto produce un patrón de difracción que se traslapa con Q. Cuando el primer mínimo del patrón de difracción producido por  $P_2$  coincide con el máximo en Q, entonces se considera despreciable la contribución a la amplitud compleja de la luz de  $P_2$  en Q.

La distancia entre patrones de difracción es dada por:

$$Q Q' = 1.22 \lambda l / a \quad (30)$$

donde  $a$  es el diámetro de la abertura de la lente y  $l$ , es la distancia de la lente al

plano imagen.

El diámetro del patrón de difracción puede ser tomado en el orden de dos veces esa cantidad:

$$d_{sp} = 2.4\lambda l/a \quad (31)$$

el radio de la mota en el plano objeto esta dada por:

$$(r_s)_{obj} = 1.22\lambda u/a \quad (32)$$

donde  $u$  es la distancia del objeto a la lente. La máxima frecuencia espacial está determinada por la abertura de la lente y la distancia al plano imagen y es.

$$f_{max} = a/\lambda l \quad (33)$$

## II.8 Interferencia entre dos frentes de onda plana.

La variación de intensidad es conocido como un patrón de franjas de interferencia. Este patrón puede ser producido por la superposición de dos frentes de onda de intensidades  $I_1$  e  $I_2$ . La intensidad resultante varía senoidalmente entre un valor máximo  $(I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2})$  y un mínimo  $(I_1 + I_2 - 2\sqrt{I_1 I_2})$ ; esta variación de intensidad es conocida como un patrón de franjas de interferencia. El patrón de franjas que se produce, es en la forma de

una serie de planos de intensidad uniforme que son paralelos al plano que bisecta al ángulo entre los dos haces.

Si tenemos dos frentes de onda descritos por las siguientes ecuaciones:

$$U_1 = u_1 \exp i(2\pi ft - k_1 \cdot r) \quad (34)$$

$$U_2 = u_2 \exp i(2\pi ft - k_2 \cdot r) \quad (35)$$

donde  $k_{1,2} = (2\pi/\lambda)n_{1,2}$ , omitiendo la dependencia del tiempo se tiene:

$$U_1 = u_1 \exp i(-k_1 \cdot r) \quad (36)$$

$$y \quad U_2 = u_2 \exp i(-k_2 \cdot r) \quad (37)$$

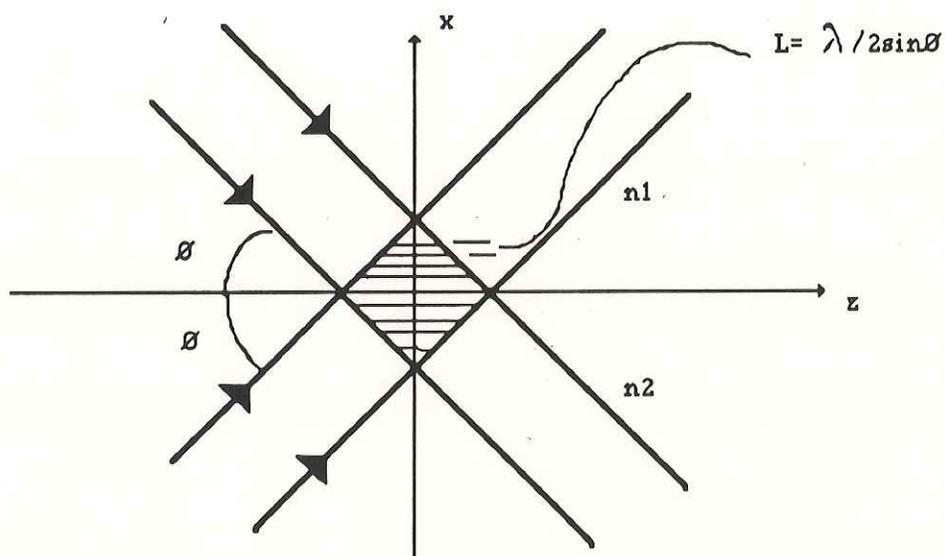


figura 8. interferencia de dos frentes de onda plana

La amplitud compleja total es:  $U_t = U_1 + U_2$  (38)

y la Intensidad resultante esta dada por:

$$I = U_t U_t^* \quad (39)$$

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(k_1 - k_2) \quad (40)$$

ó por:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(4\pi x \sin \emptyset / \lambda) \quad (41)$$

siendo ésta es la variación de intensidad producida por la superposición de los dos frentes de onda.

La distancia entre franjas es.

$$L = \lambda / 2 \sin \emptyset. \quad (42)$$

## II.9. Coeficientes de correlación en la correlación de patrones de moteado.

El coeficiente de correlación de dos variables aleatorias X y Y se define como (Jones, 1983).

$$\rho_{xy} = \frac{\langle XY \rangle - \langle X \rangle \langle Y \rangle}{\sigma_x \sigma_y} \quad (43)$$

donde  $\sigma_x = (\langle x^2 \rangle - \langle x \rangle^2)^{1/2}$ ,  $\sigma_y = (\langle y^2 \rangle - \langle y \rangle^2)^{1/2}$  y se puede demostrar que si X y Y son independientes, se cumple que:

$$\langle XY \rangle = \langle X \rangle \langle Y \rangle \quad (44)$$

y en este caso el coeficiente de correlación será cero.

Considerando que tenemos funciones que representan variaciones de intensidad producidas por la superposición de dos frentes de onda y que son dadas por las siguientes ecuaciones:

$$I_1 = I_r + I_o + 2\sqrt{I_r I_o} \cos \phi \quad (45)$$

y

$$I_2 = I_r + I_o + 2\sqrt{I_r I_o} \cos(\phi + \Delta \phi) \quad (46)$$

donde  $I_2$  tiene un término de desfase  $\Delta \phi$  el cual indicaría que el objeto ha sufrido un movimiento.

El coeficiente de correlación de las funciones  $I_1$  e  $I_2$  se puede encontrar sustituyendo  $I_1$  e  $I_2$  en la ecuación (43) (Jones, 1983) obteniéndose que:

$$\rho(\Delta \phi) = \langle I_1 I_2 \rangle - \langle I_1 \rangle \langle I_2 \rangle / (\langle I_1^2 \rangle - \langle I_1 \rangle^2)^{1/2} (\langle I_2^2 \rangle - \langle I_2 \rangle^2)^{1/2} \quad (47)$$

Esto puede ser evaluado, considerando lo siguiente:

i)  $I_o$ ,  $I_r$  y  $\phi$  son variables independientes y pueden ser promediadas por separado.

$$\text{ii) } \langle \cos(\phi) \rangle = \langle \cos(\phi + \Delta\phi) \rangle = 0$$

$$\text{iii) } \langle I^2 \rangle = 2 \langle I \rangle^2$$

si se considera que  $\langle I_r \rangle = \langle I_o \rangle = \langle I \rangle$ , se obtiene.

$$\rho(\Delta\phi) = 1/2(1 + \cos(\Delta\phi)) \quad (48)$$

Entonces la correlación es máxima cuando  $\Delta\phi = 2n\pi$ , y cero cuando  $\Delta\phi = (2n+1)\pi$ .

Si  $\langle I_r \rangle = r \langle I_o \rangle$ , tenemos que el coeficiente de correlación esta dado por:

$$\rho(\Delta\phi) = (1+r^2 + 2r \cos(\Delta\phi)) / (1+r)^2 \quad (49)$$

tenemos un valor máximo de la unidad cuando  $\Delta\phi = 2n\pi$  y un valor mínimo de  $[(1-r)/(1+r)]^2$  cuando  $\Delta\phi = (2n+1)\pi$ .

Para obtener el resultado anterior se supone que los términos  $I_r$ ,  $I_o$  y  $\phi$  no varían cuando hay un cambio en  $\Delta\phi$ . Si no es así, entonces el valor máximo del coeficiente de correlación se reduce, y si el cambio es suficientemente grande, no hay una correlación de las funciones  $I_1$  e  $I_2$ , entonces en el patrón resultante no se producen franjas.

### III. DESCRIPCION DEL INTERFEROMETRO ELECTRONICO DE PATRONES DE MOTEADO.

#### III.1 Introducción.

El procesamiento electrónico de las imágenes de patrones de moteado, es conocido como Interferómetro Electrónico de Patrones de Moteado (ESPI). La gran ventaja del ESPI, es que facilita el despliegue de franjas por correlación de intensidad de patrones de moteado, indicando el movimiento del objeto en un tiempo real y despliega el patrón de franjas en un monitor de televisión, sin tener que recurrir a procesamientos fotográficos. Es comparativamente fácil de usar y su aplicación se ha extendido a problemas más complejos como medición de formas, deformaciones y análisis de vibraciones. La resolución del medio de grabado utilizado por esta técnica, es comparativamente bajo comparado con el requerido para el grabado holográfico. En esta técnica, es necesario que el patrón de moteado sea detectado por la cámara de televisión. El tamaño del gránulo es del orden de  $5\mu\text{m}$  a  $100\mu\text{m}$ , de manera que una cámara de televisión estándar puede ser usada para grabar el patrón de moteado de un objeto iluminado por luz láser.

La correlación de intensidad en el ESPI, es realizada por un proceso electrónico de sustracción y adición de imágenes. El proceso de sustracción de imágenes, corresponde a la correlación de intensidades de patrones de moteado, es decir, se graba una imagen del objeto en memoria digital y después de ser desplazado el objeto, se capta otra imagen y se resta digitalmente a la anterior que se encuentra almacenada en memoria.

Entonces la imagen resultante se despliega en un monitor de televisión, donde se pueden observar las franjas de correlación de intensidad. Existe otra forma de obtener franjas de correlación, este método es sumando la imagen del patrón de moteado del objeto a la imagen del patrón del mismo, después de haber sufrido un desplazamiento. Después de este proceso se despliega la imagen resultante en un monitor de televisión.

En este capítulo se presenta la descripción del Interferómetro Electrónico de Patrones de Moteado. Aquí se describen los diferentes tipos de arreglos ópticos que pueden ser usados para el interferómetro. También se hace un análisis para la interferencia de frentes de onda entre un patrón de moteado y el haz de referencia suavizado, se presenta un análisis de formación de franjas por correlación de intensidad y por último, se hace la deducción de los gradientes de desplazamiento para movimientos fuera de plano en un sistema óptico cuando el haz de referencia es suavizado.

### III.2 Sistema de video.

El sistema de video del interferómetro convierte una imagen que es formada en el detector de una cámara de televisión en una señal eléctrica y posteriormente esta señal entra a una tarjeta digitalizadora de imágenes y es procesada electrónicamente. El diámetro estándar del tubo de una cámara es de 25mm y el área activa es de 12x10mm, donde la imagen debe ser de-amplificada a este tamaño. El detector de la cámara tiene una capa de material fotosensible en donde se producen cargas eléctricas que son proporcionales a la intensidad luminosa de la imagen.

La superficie del detector es barrida por un haz de electrones que da un voltaje de salida. Después esta señal entra a un sistema de adquisición de imágenes (tarjetas digitalizadoras de imágenes) y de las tarjetas sale una señal de voltaje que modula un haz de electrones que barre la pantalla del monitor, de manera que las partes más brillantes de la pantalla corresponden a las zonas de mayor intensidad de la imagen original. Idealmente, el brillo del monitor debe variar linealmente con la intensidad de la imagen original. La resolución exacta entre la intensidad del monitor y de la imagen original es una complicada función del proceso electrónico, cámara de televisión, sistema de adquisición de imágenes y del monitor de televisión. En el despliegue de las franjas por correlación de patrones de moteado, se considerará lo siguiente:

- i) El voltaje de salida de la cámara es linealmente proporcional a la intensidad de la imagen.
- ii) El brillo de la imagen en el monitor es proporcional a la salida de voltaje de la cámara.

Este modelo da una buena descripción cualitativa del proceso, sin embargo, se debe entender que una descripción cuantitativa de la visibilidad de las franjas en el ESPI no es posible con esta descripción.

La resolución espacial y el rango dinámico del sistema de video es considerablemente menor que en emulsiones fotográficas y holográficas. Estos factores afectan el diseño de los interferómetros que utilizan un sistema de video.

### III.3 Sistema de adquisición y correlación de imágenes.

El proceso digital de imágenes consiste de un convertidor análogo-digital de alta velocidad y memoria digital. Este sistema se muestra en la figura 9.

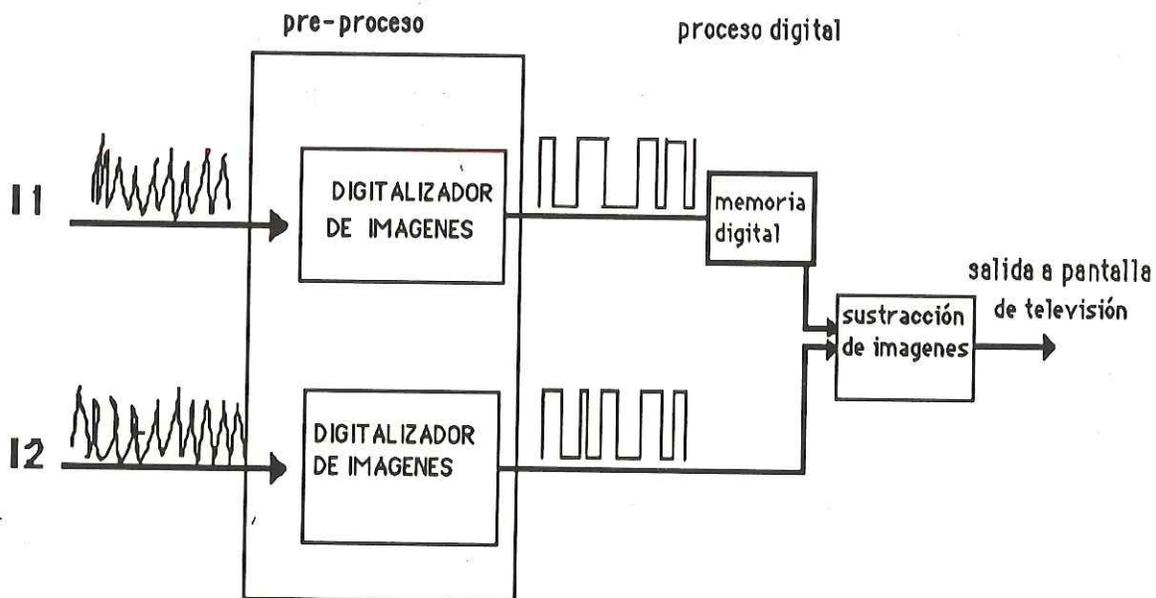


Figura 9. Sistema de adquisición y correlación de imágenes.

Este sistema digitaliza la señal de video y la guarda en memoria digital en una matriz de 512x512 elementos de imagen (pixel). La luz de un láser He-Ne es dividida en dos haces de luz, el haz del objeto y el haz de referencia. La luz difractada por el objeto y la proveniente directamente del láser siendo éste el haz de referencia, se colectan en el detector de la cámara de televisión por medio de una lente.

En el proceso de correlación de imágenes, la imagen del patrón de moteado

del objeto es convertida a una señal eléctrica I1, que posteriormente por medio del convertidor analógico-digital es convertida a una señal binaria y almacenada en memoria digital. El convertidor analógico-digital toma la señal de video y forma una imagen digital de 512x512 elementos de imagen.

Estos dos pasos del proceso, digitalizar y guardar en memoria la imagen se hacen en 1/30 de segundo. Después que el objeto ha sufrido algún movimiento o deformación, se capta otra imagen del patrón de moteado del objeto que es convertida a la señal eléctrica I2 y esta señal se digitaliza. Posteriormente se procede a la correlación de intensidad de las dos imágenes. La correlación de intensidad de imágenes puede ser hecha por una resta o suma de la imagen del objeto antes del movimiento de éste, con la imagen obtenida después del movimiento del objeto. La imagen resultante de la correlación de imágenes se despliega en un monitor de televisión. Con este tipo de procesamiento digital, se tiene la ventaja de que la imagen resultante (con franjas de correlación) puede procesarse punto por punto en varias formas. Se puede hacer un proceso de contraste lineal, realce de contraste o realce de contraste arbitrario y posteriormente convertirse a una señal análoga de tal manera que sea la señal de entrada a un monitor de televisión. En la figura 10 se muestran esquemas del procesamiento digital.

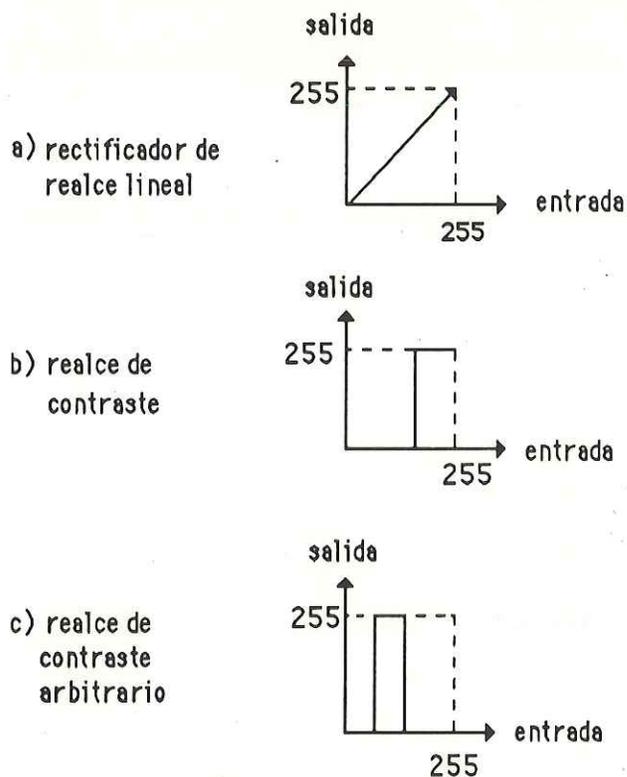


figura 10.  
Representación esquemática del procesamiento digital de la imagen resultante (con franjas de correlación)

#### III.4 Arreglos ópticos para el interferómetro electrónico de patrones de moteado.

Existen varios tipos de interferómetros los cuales serán discutidos a continuación. Estos son:

- i) Interferómetro basado en el arreglo de Michelson que es sensible a desplazamientos fuera de plano.
- ii) Interferómetro sensible a gradientes fuera de plano.
- iii) Interferómetro sensible a movimientos en plano
- iv) Interferómetro sensible a movimientos fuera de plano con el haz de

referencia suavizado. Este tipo de interferómetro es el que se utiliza en este trabajo, por lo tanto, será analizado detalladamente más adelante.

Para los primeros tres interferómetros los dos haces se obtienen de superficies rugosas. Se verá que las restricciones impuestas por la limitada resolución espacial y rango dinámico del sistema de video, son enteramente diferentes para el sistema del haz de referencia suavizado, que para los otros interferómetros que tienen los dos haces de moteado.

En la práctica predominan los arreglos sensibles a movimientos en plano (iii) y fuera de plano (iv). El arreglo sensible a movimientos fuera de plano (iv) requiere más cuidado, pero es más usado porque es más eficiente en el uso de luz y además, porque da información de las vibraciones del objeto.

#### III.4.1 Sistema de haz de referencia suavizado.

En la figura 11 se muestra un sistema óptico con el haz de referencia suavizado. El haz de referencia es enfocado por un objetivo de microscopio (lente L2) en un orificio de  $25\mu\text{m}$  y el haz de referencia que resulta es un frente de onda esférico libre de ruido ya que el orificio elimina las variaciones rápidas del frente de onda que sale del lente L2. El frente de onda  $U_1$  es reflejado por la superficie de un divisor de haz B, cuyas caras del divisor de haz no son completamente paralelas ya que hay un ángulo de 1 grado entre ellas. Idealmente el divisor de haz tiene películas antirreflectoras en la cara posterior para eliminar las reflexiones secundarias. Nótese que una cuña similar es colocada en el tubo de la cámara; esto evita la formación de franjas de interferencia por múltiples reflexiones. El punto donde el haz de referencia

diverge,  $Q$ , es el conjugado del punto centrado en la abertura del lente,  $Q'$ . A medida que la longitud focal de la lente  $L3$  decrece, la distancia al plano imagen se aproxima a la cantidad de espacio que ocupa el divisor de haz. La mínima longitud focal práctica es de 40mm. La luz difractada por el objeto es colectada por la lente  $L3$  y esta lente forma la imagen en el plano  $I$ , donde esta imagen interfiere con  $U_r$ . Este sistema tiene la desventaja de que partículas de polvo tienden a depositarse en la superficie del divisor de haz. Esto causa ruido en el haz de referencia y degrada las franjas producidas por correlación de intensidad.

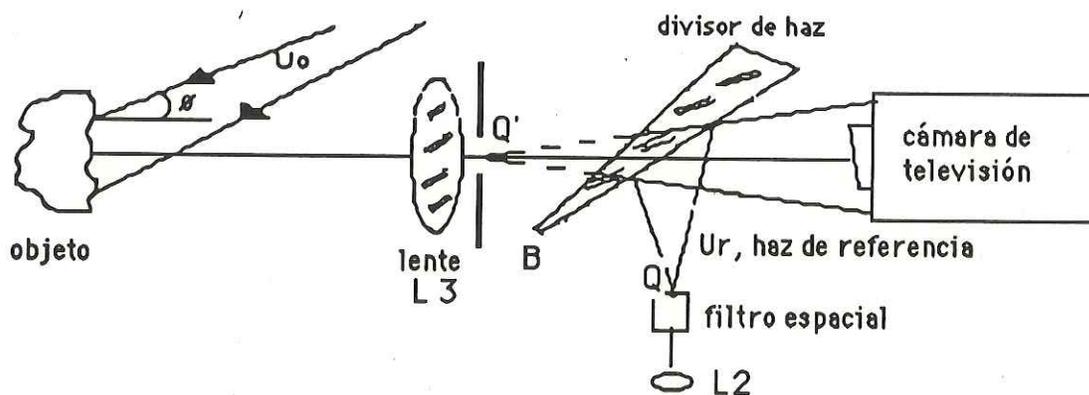


Figura 11. Interferómetro con haz de referencia suavizado

### III.4.2 Interferómetros sensibles a desplazamientos en el plano.

Hay dos posibles arreglos sensibles a desplazamientos fuera de plano, éstos se muestran en la figura 12 y 13. En la figura 12 los dos frentes de onda  $U_0'$  y  $U_0''$  se obtienen reflejando la mitad del frente de onda  $U_p$  que ilumina el objeto  $D$  por medio del espejo  $M$ . Cuando no es conveniente poner un espejo en la superficie se utiliza el arreglo mostrado en la figura 13. En este caso el frente de onda plano  $U_p$  es dividido en las componentes  $U_0'$  y  $U_0''$  por las caras reflectoras del prisma  $P$ . Estos haces son reflejados hacia el objeto por los espejos  $M_1$  y  $M_2$ . La luz difractada por el objeto es reflejada por el espejo  $M_3$  y colectada por la lente  $L$ .

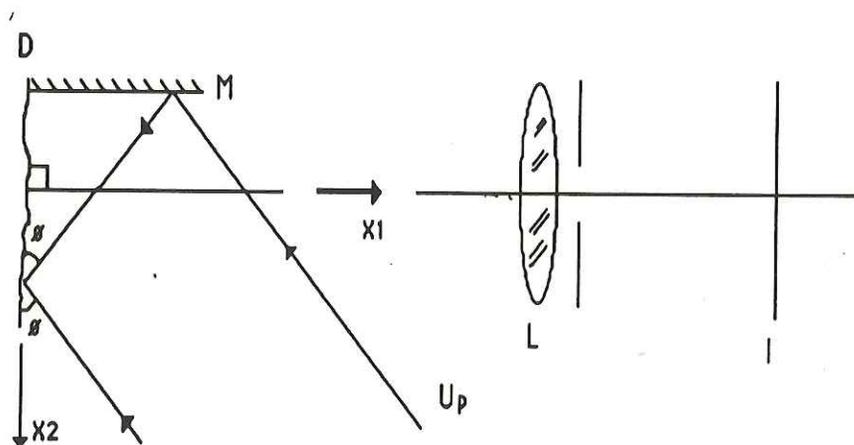


Figura 12. Interferómetro sensible a movimientos en el plano.

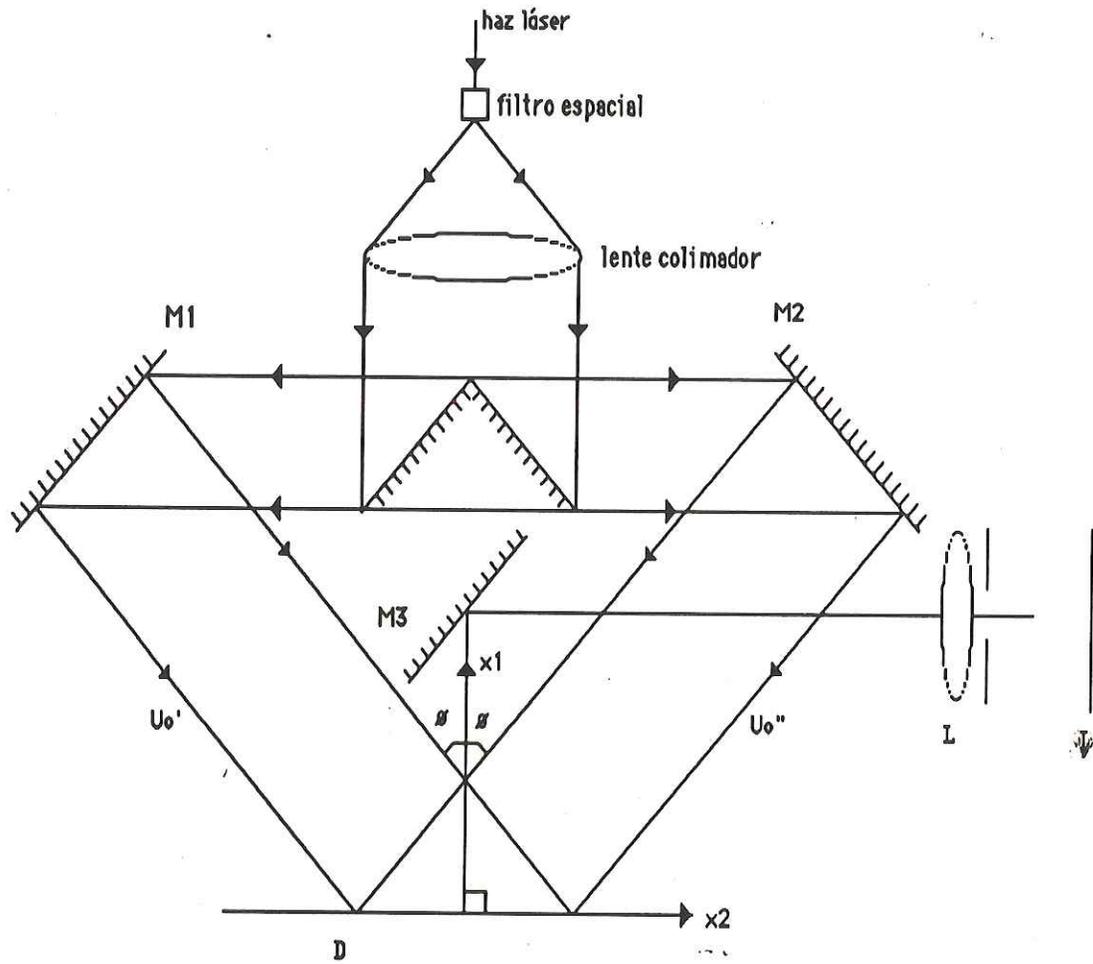


Figura 13. Arreglo alternativo sensible a movimientos en el plano.

### III.5 Interferómetro sensible a desplazamientos fuera del plano con el haz de referencia suavizado.

Un diagrama de este sistema se muestra en la figura 14. D es una superficie ópticamente rugosa paralela al plano  $x$  y  $y$  y la normal a esta superficie está en el eje  $z$ . Esta superficie es iluminada por un frente de onda divergente  $U_0$  inclinado un ángulo  $B$  con respecto al eje  $z$  (3). Esta superficie es vista en una dirección normal, a través de la abertura de la lente, donde la abertura esta centrada en las coordenadas  $(0,0,l_0)$ . La imagen del patrón de moteado de la superficie D, es formado en el plano imagen I, e interfiere con el haz de referencia suavizado  $U_r$  que diverge del punto R en  $(\Delta x_r, 0, l_r)$ , donde asumimos que  $\Delta x_r \ll l_r$  tanto en el ángulo entre el haz del objeto y el haz de referencia,  $\alpha$ , se puede aproximar a:

$$\alpha = \Delta x_r / l_r \quad (50)$$

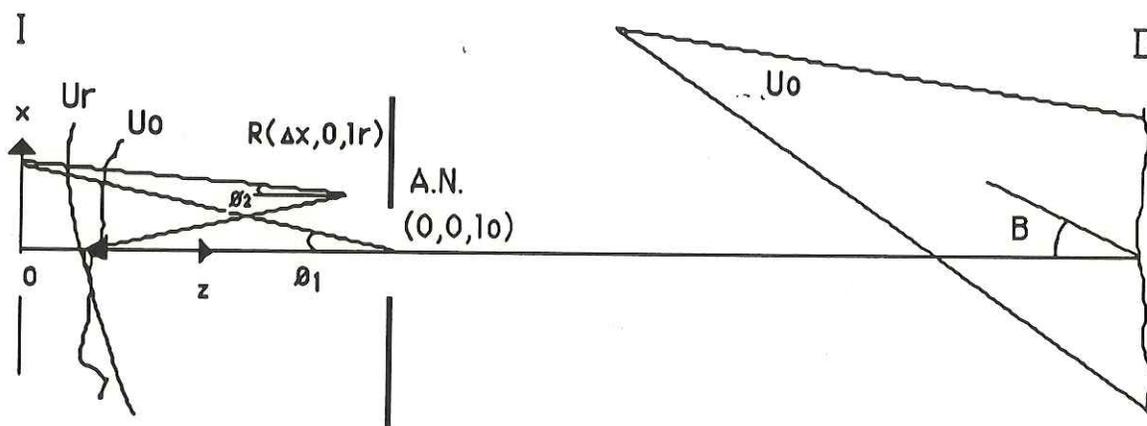


Figura 14. Interferómetro sensible a desplazamientos fuera del plano con el haz de referencia suavizado.

Las amplitudes complejas de los frentes de onda del haz del objeto y el haz de referencia, se pueden escribir como:

$$U_O = u_O \exp(i\phi_O) \quad (51)$$

$$U_r = u_r \exp(i\phi_r) \quad (52)$$

donde

$\phi_O$  = fase del frente de onda del haz del objeto y

$\phi_r$  = fase del frente de onda del haz de referencia.

Estas fases están dadas por:

$$\phi_O = \phi_O + \phi_p + 2\pi/\lambda (l_o + (x^2/2l_o) \cos\phi_1) \quad (53)$$

y

$$\phi_r = \phi_q + 2\pi/\lambda (l_r + (x^2/2l_r) \cos\phi_2 + x\Delta x/l_r) \quad (54)$$

donde

$\phi_O$  = fase de la amplitud de una mota individual que varía aleatoriamente.

$\phi_p$  = fase de  $U_O$  en  $(0,0,l_o)$  y

$\phi_q$  = fase de  $U_r$  en  $(\Delta x,0,l_r)$

Para un desplazamiento  $\Delta x$  y valores de  $l_o, l_r$  pequeños, se tiene que:

$$\cos\phi_1 = \cos\phi_2 = l_o/(l_o^2 + x^2)^{1/2} \quad (55)$$

la intensidad en un punto  $x$ ,  $I(x)$  está dada por  $(U_r+U_o)(U_r+U_o)^*$  entonces

$$I(x) = I_r + I_o + 2 \sqrt{I_r I_o} \cos(\phi_o - \phi_r) \quad (56)$$

donde

$$\phi_o - \phi_r = 2\pi/\lambda (\Delta l + \Delta l x^2/(2lr(l_o^2 + x^2)^{1/2}) + x \Delta x/ lr) + \phi_o + \psi \quad (57)$$

$$\Delta l = l_o - lr \quad (58)$$

$$\psi = \phi_p - \phi_q \quad (59)$$

$$I_r = U_r U_r^* = \text{intensidad del haz de referencia en } x. \quad (60)$$

$$I_o = U_o U_o^* = \text{intensidad del moteado en } x. \quad (61)$$

La ecuación (56) es una expresión general para la distribución de intensidad en el plano imagen de este tipo de interferómetros y consiste de dos componentes:

a) un patrón de interferencia formado por los frentes de onda de fase relativa.

$$\Delta\phi(x) = 2\pi/\lambda (\Delta l + \Delta l x^2/(2lr(l_o^2 + x^2)^{1/2}) + x \Delta x/ lr) + \psi \quad (62)$$

modulada por

b) una distribución de intensidad de fase aleatoria  $\phi_o$  introducida por el patrón

de moteado.

Para sistemas prácticos, el valor máximo de  $x$  es típicamente  $< l_0/10$  y el término de segundo orden  $x$  puede ser despreciado con respecto a  $l_0^2$  en la ecuación anterior (62), y se puede escribir como.

$$\Delta\phi(x) = 2\pi/\lambda (\Delta l + \Delta l x^2/2lr l_0 + x \Delta x_r/lr) + \psi \quad (63)$$

La frecuencia espacial de la interferencia entre los dos frentes de onda puede ser calculada de la ecuación anterior(63). Si derivamos la ecuación anterior con respecto a  $x$  nos queda:

$$\partial \Delta\phi(x)/\partial x = 2\pi/\lambda (\Delta l x/lr l_0 + \Delta x_r/lr) \quad (64)$$

utilizando la aproximación  $\partial \Delta\phi(x)/\partial x = 2\pi/\Delta x = 2\pi w$ , donde  $w$  es la frecuencia espacial, entonces de la ecuación (64) puede escribirse como.

$$w = 1/\lambda (\Delta l x/(l_0(l_0 - \Delta l)) + \Delta x_r/lr) \quad (65)$$

Analizando esta ecuación se observa que  $w$  es insensible a pequeñas desviaciones alrededor de  $\Delta l=0$ , pero incrementa rápidamente cuando  $\Delta x_r$ , se separa de cero. En la práctica la frecuencia espacial es disminuída haciendo  $\Delta x_r=0$  y  $\Delta l$  pequeña comparada con  $l_0$ .

Para optimizar la visibilidad de las franjas de correlación,  $\Delta x_r$  y  $\Delta l$  deben

ser hechas tan pequeñas como sea posible. Se observa que los desplazamientos en la dirección lateral da una variación más rápida de la frecuencia angular  $\omega$  que los desplazamientos en la dirección longitudinal, entonces todos los desplazamientos en la dirección lateral deben ser minimizados.

### III.6 Principio de formación de franjas por correlación de patrones de moteado.

Considerando el interferómetro mostrado en la siguiente figura 15. Un frente de onda plano es dividido en dos componentes de la misma intensidad por el divisor de haz B (Jones, 1983). Estos haces iluminan las superficies ópticamente rugosas D1 y D2. Estos frentes de onda son difractados por D1 y D2 e interfieren en el plano imagen de la lente L.

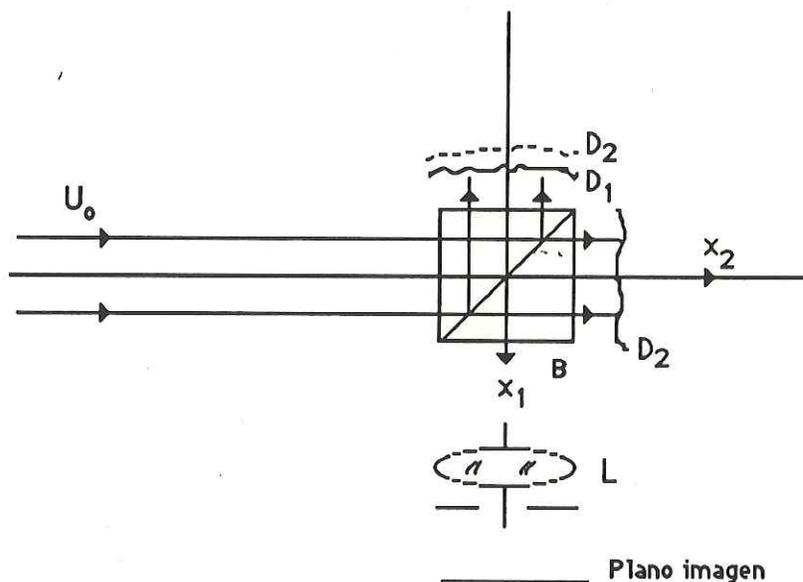


Figura 15. Interferómetro sensible a desplazamientos fuera del plano con los dos haces de moteado.

La distribución de intensidad en el plano imagen consiste del patrón de interferencia formado por la imagen del patrón de moteado de la superficie D1 y el patrón de moteado de la superficie D2. Tomando

$$U_0 = u_0 \exp(i\phi_0) \quad (66)$$

y

$$U_r = u_r \exp(i\phi_r) \quad (67)$$

como las amplitudes complejas de estos frentes de onda, donde  $u_0, u_r$  y  $\phi_0, \phi_r$  son las amplitudes aleatorias y fases de estos frentes de onda. La intensidad en un punto dado del plano imagen esta dado por la ecuación (56). Donde  $I_1$  es igual a  $I(x)$ .

$$I_1 = I_r + I_0 + 2 \sqrt{I_r I_0} \cos(\psi) \quad (68)$$

donde de la ecuación (59).

$$\psi = \phi_p - \phi_q \quad (69)$$

y

$$I_r = U_r U_r^* \quad (70)$$

$$I_0 = U_0 U_0^* \quad (71)$$

Cuando la superficie  $D_1$  es desplazada una distancia  $d_1$  paralela a la superficie normal, el cambio de fase resultante es dado por:

$$\Delta\phi(d1) = 4\pi d1/\lambda \quad (72)$$

entonces esto cambia la intensidad en un punto del plano imagen y la nueva intensidad esta dada por.

$$I2 = I_r + I_o + 2 \sqrt{I_r I_o} \cos(\psi + \Delta\phi(d1)) \quad (73)$$

El coeficiente de correlación  $\rho(I1, I2)$  de  $I1$  e  $I2$  es calculado en el capítulo II (II.9) y se muestra que cuando

$$\Delta\phi = 2n\pi \quad n=0,1,2,3,\dots \quad (74)$$

$I1$  e  $I2$  tiene una correlación máxima; también se puede observar de las ecuaciones (68) y (69) que cuando  $I1 = I2$ , el coeficiente de correlación es cero, entonces  $I1$  e  $I2$  no se correlacionan cuando

$$\Delta\phi = (2n+1)\pi \quad n=0,1,2,3,\dots \quad (75)$$

Utilizando la ecuación (72) se puede obtener que un máximo en la correlación ocurre cuando

$$d1 = n\lambda/2 \quad (76)$$

y una correlación mínima existe cuando

$$d1 = (n+1/2)\lambda / 2 \quad (77)$$

entonces, la variación en la correlación, representa una variación de desplazamiento  $d1$  normal a la superficie del objeto. Las variaciones en la correlación de patrones de moteado pueden ser utilizadas para generar un patrón de franjas.

### III.7 Formación de franjas por correlación de intensidad usando sustracción de imágenes.

La cámara de televisión recibe la imagen del objeto y da una señal de salida en forma de voltaje. Esta señal es enviada a una tarjeta digitalizadora de imágenes, y la imagen digitalizada es guardada en memoria digital. Después que el objeto ha sufrido alguna deformación, se obtiene otra imagen digital y se resta electrónicamente de la imagen almacenada en memoria. Podemos considerar que la intensidad  $I1$  corresponde a la intensidad de la imagen 1 antes del movimiento del objeto e  $I2$  corresponde a la intensidad de la segunda imagen después del movimiento del objeto. Las intensidades  $I1$  y  $I2$  están dadas por las siguientes ecuaciones.

$$I1 = I_r + I_o + 2\sqrt{I_r I_o} \cdot \cos(\psi) \quad (78)$$

y

$$I2 = I_r + I_o + 2\sqrt{I_r I_o} \cdot \cos(\psi + \Delta\phi) \quad (79)$$

Si la señal almacenada en forma digital es proporcional a la intensidad de la imagen real, entonces la sustracción de imágenes estará dada por:

$$V_s = (V_1 - V_2) \propto (I_1 - I_2) = 2\sqrt{I_r I_o} \cdot [\cos \psi - \cos(\psi + \Delta\phi)] \quad (80)$$

además, se puede escribir como.

$$V_s = 4 \sqrt{I_r I_o} \cdot \sin(\psi + \Delta\phi/2) \cdot \sin(\Delta\phi/2) \quad (81)$$

Esta señal tiene valores positivos y negativos. El monitor de video despliega los valores cero como áreas negras. Las áreas brillantes en el monitor son proporcionales a  $|V_s|$ . Entonces el monitor da una imagen proporcional a:

$$B = 4 K [I_r I_o \sin^2(\psi + \Delta\phi/2) \cdot \sin^2(\Delta\phi/2)]^{1/2} \quad (82)$$

donde K es una constante. Los valores máximos y mínimos de B están dados por.

$$B_{\text{máx}} = 2 k \sqrt{I_r I_o}, \quad \Delta\phi = (2n + 1)\pi \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (83)$$

$$B_{\text{mín}} = 0, \quad \Delta\phi = 2n\pi \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (84)$$

### III.7.1 Formación de franjas por correlación de intensidad por suma de imágenes.

Con este método el procedimiento para adquisición de imágenes es semejante al anteriormente descrito, solamente que las imágenes ahora, en vez de restarse, se suman. La ecuación resultante de la suma de las ecuaciones (78) y (79) es.

$$\delta_R = (I_1 + I_2) = 2I_r + 2I_o + 4\sqrt{I_r I_o} \cos(\psi + \Delta\phi) \cos(\Delta\phi/2) \quad (85)$$

El contraste del patrón de moteado se puede definir como la desviación estándar de la intensidad. tomando a  $\Delta\phi$  como una constante, se llega a la ecuación.

$$\sigma_{I2} = 2[\sigma_r^2 + \sigma_o^2 + 8 \langle I_r \rangle \langle I_o \rangle \cos^2(\Delta\phi/2)]^{1/2} \quad (86)$$

donde  $\sigma_r$  y  $\sigma_o$  son las desviaciones estándar de  $I_r$  y  $I_o$ . Se observa que  $\sigma_o$  varía entre valores máximos y mínimos dados por:

$$[\sigma_o]_{\text{máx}} = 2[\sigma_r^2 + \sigma_o^2 + 2I_r I_o]^{1/2}, \quad \Delta\phi = 2n\pi \quad n=0,1,2,3,\dots \quad (87)$$

y

$$[\sigma_o]_{\text{mín}} = 2[\sigma_r^2 + \sigma_o^2]^{1/2}, \quad \Delta\phi = (2n + 1)\pi, \quad n=0,1,2,3,\dots \quad (88)$$

El brillo resultante en el monitor se puede considerar proporcional a la raíz cuadrada de  $\sigma_{ro}$ , que está dado por:

$$B = K[\sigma_r^2 + \sigma_o^2 + 2 \langle I_r \rangle \langle I_o \rangle \cos^2(\Delta\phi/2)]^{1/2} \quad (89)$$

en la práctica se puede observar que las franjas dadas por resta de imágenes tienen un mejor contraste que las franjas dadas por suma de imágenes.

### III.8 Observación de desplazamientos dinámicos usando correlación de patrones de moteado.

Un interferómetro en donde el haz de referencia es suavizado como el que se muestra en la figura 16, es usado para la observación de desplazamientos dinámicos. El rango de aplicación de este tipo de interferómetro se extiende considerablemente cuando se usa un interferómetro electrónico de patrones de moteado de moteado.

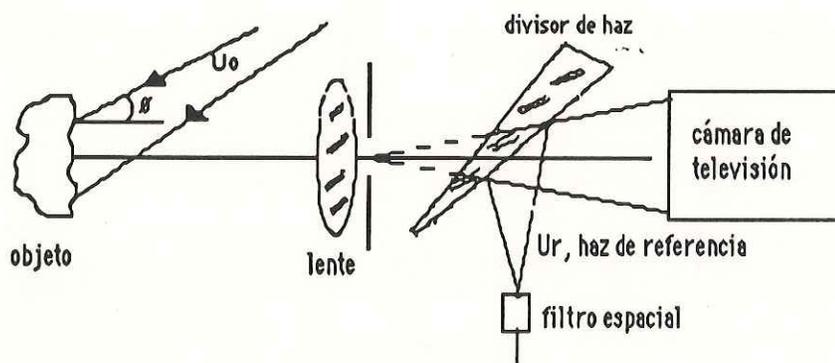


Figura 16. Arreglo óptico para la correlación de patrones de moteado sensible a movimientos fuera del plano.

Consideremos el principio de la técnica usada para la observación de las franjas por correlación de intensidad a tiempo promedio. El interferómetro de la figura 17 fue desarrollado por Archbold (Archbold, 1969) y Stetson (Stetson, 1970) y es una extensión del arreglo básico mostrado anteriormente.

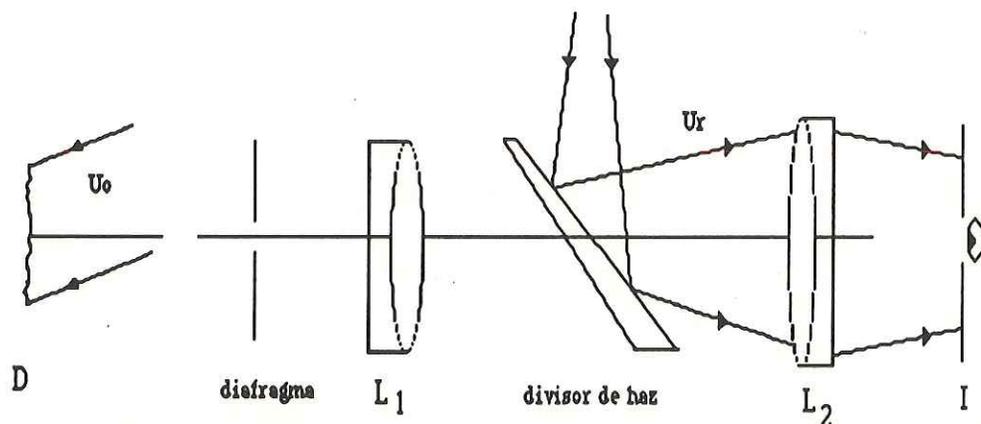


figura 17. Interferómetro de correlación de patrones de moteado para la detección visual de modos de vibración de tiempo promedio.

Esto habilita la observación de franjas de tiempo promedio vistas con el ojo en el plano imagen del lente  $L_2$ . En un tiempo dado  $t$ , la intensidad en ese plano es dada por  $I(t)$  donde.

$$I(t) = I_R + I_o + 2 \sqrt{I_R I_o} \cos[\phi_R - \phi_o + 4\pi a(t)/\lambda] \quad (90)$$

y  $a(t)$  representa la posición de un punto dado en el objeto a un tiempo  $t$ . El ojo humano o una placa fotosensible detectará la intensidad promedio en un tiempo

$\tau$ , dado por.

$$I_{\tau} = I_r + I_0 + \frac{2}{\tau} \sqrt{(I_r I_0)} \int_0^{\tau} \cos[\theta_r - \theta_0 + 4\pi a(t)/\lambda] dt \quad (91)$$

cuando se evalúa para una vibración senoidal

$$a(t) = a_0 \sin \omega t \quad \text{donde } 2\pi/\omega \ll \tau \quad (92)$$

se encuentra que:

$$I_{\tau} = [I_r + I_0 + 2 \sqrt{(I_r I_0)} \cos(\theta_r - \theta_0) \cdot J_0^2(4\pi a_0/\lambda)] \quad (93)$$

Donde  $J_0$  es una función Bessel de orden cero y de primera clase. El valor de  $I_{\tau}$  promedio producido por muchas motas es constante sobre toda la imagen, pero se puede observar que el contraste del moteado varía con el valor de la función  $J_0^2$ . Cuando  $J_0^2$  tiene el valor de cero, la intensidad varía sólo con  $I_0$ , y si  $J_0^2$  tiene un valor máximo, la intensidad varía con la variación de  $I_0$  y  $2 \sqrt{(I_r I_0)} \cdot \cos[\theta_r - \theta_0]$ . Así la amplitud de la variación es mostrada como una variación en el contraste del patrón de moteado. Las áreas de mínimo contraste ocurren cuando.

$$a_0 = n\lambda/4 \quad n = 1,2,3,\dots \quad (94)$$

### III.9 Gradientes de desplazamiento para el interferómetro sensible a desplazamientos fuera del plano.

Si la geometría del interferómetro es una en la que la dirección de iluminación no es en la dirección normal a la superficie a analizar, entonces la forma general de  $\Delta\phi$  esta dada por:

$$\Delta\phi = (2\pi/\lambda) (n_o - n_s) d \quad (95)$$

donde.  $n_o$  es la dirección de iluminación y

$n_s$  es la dirección de observación.

Si la diferencia de ángulos o los ángulos que hay entre  $\tilde{n}_o$  y  $\tilde{n}_s$  es menor que  $15^\circ$ , entonces la ecuación anterior se puede escribir como:

$$\Delta\phi = (2\pi/\lambda) ( \cos\theta_1 - \cos\theta_2 ) d \quad (96)$$

donde.

$\theta_1$  es el ángulo entre la dirección de iluminación y la normal a la superficie del objeto.

$\theta_2$  es el ángulo de la dirección de observación a la superficie normal.

Un arreglo que produce franjas con información de desplazamientos fuera del plano se muestra en la siguiente figura 18.

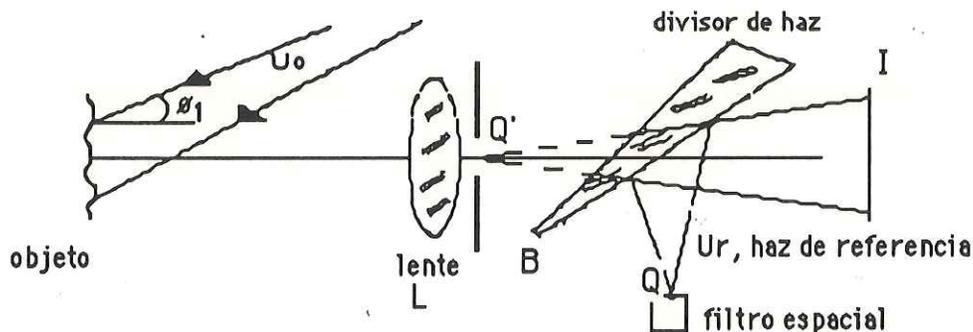


Figura 18. Arreglo óptico con el haz de referencia suavizado sensible a desplazamientos fuera del plano.

El objeto es iluminado por el haz del objeto  $U_0$  a un ángulo  $\theta_1$  con la normal a la superficie y la imagen es formada por la lente L en I. Un frente de onda esférico de referencia es sumado a la imagen por el divisor de haz B. Cuando el objeto es desplazado una distancia  $d_1$ , el cambio de fase del haz del objeto con respecto al haz de referencia es dado por:

$$\Delta\phi = (2\pi/\lambda) (\cos\theta_1 - \cos\theta_2) d_1 \quad (97)$$

Interferómetros basados en este tipo de arreglo pueden ser usados para observar movimientos fuera del plano y para el análisis de vibraciones. En este caso, cuando el objeto es desplazado, el cambio de fase del haz del objeto y el haz de referencia es dado por la ecuación (96) con  $\theta_2 = 0$ .

Vamos a considerar que la superficie de la figura 17. se mueve fuera del

plano como se muestra en la siguiente figura 19.

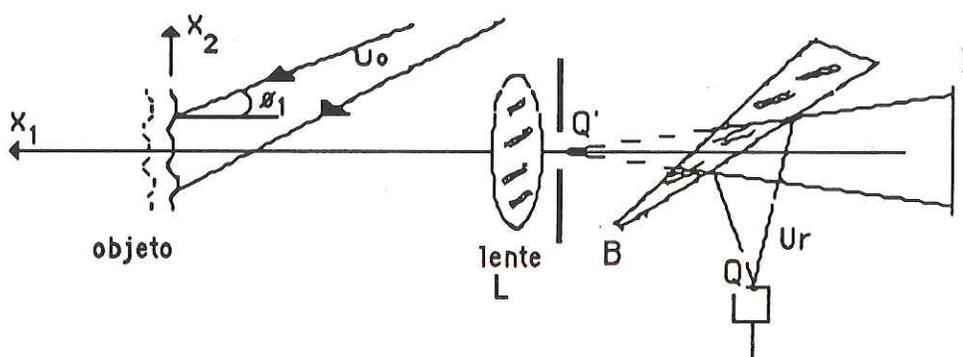


Figura 19. Arreglo óptico sensible a movimientos fuera del plano.

La intensidad en un punto  $Q$  en el plano imagen, corresponde a la superposición de la luz difractada por dos puntos adyacentes del objeto. La separación de estos puntos es  $S_2$ , el desplazamiento del objeto es en la dirección  $x_1$ . Vamos a suponer que la amplificación de la imagen es de uno, entonces representando la imagen por medio de la figura 20, tenemos la superposición de las dos imágenes del objeto, antes y después de haber sufrido algún desplazamiento.

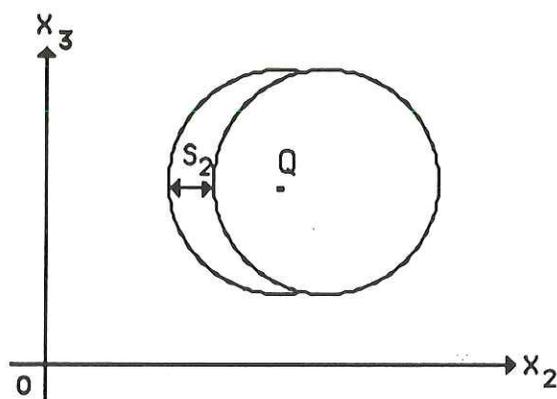


Figura 20. Imagen del objeto, con un corrimiento de  $S_2$ .

Si el objeto es desplazado, vamos a representar como  $d$  la diferencia de camino óptico entre el haz del objeto y el haz de referencia y  $d'$  el desplazamiento respectivo del punto que ilumina a  $Q$ . La fase de la luz que llega a  $Q$  sufre un cambio de fase de:

$$\Delta\phi = (2\pi/\lambda) (n_o - n_s) (d - d') \quad (98)$$

como se dijo anteriormente,  $\vec{n}_o$  y  $\vec{n}_r$  son las direcciones de iluminación del haz del objeto y el haz de referencia. Cuando las direcciones del haz del objeto y el haz de referencia son normales se tiene que la diferencia de fase es.

$$\Delta\phi = (4\pi/\lambda) \Delta d_1 \quad (99)$$

y  $\Delta d_1$  se puede escribir como:

$$d_1(x_2) - d_1(x_{02}) = \partial d_1 / \partial x_2 (\Delta x_2) + \partial^2 d_1 / \partial x_2^2 (\Delta x_2)^2 \dots \quad (100)$$

donde  $d_1(x_{02})$  es el desplazamiento en el punto  $x_{02}$ . La separación  $S_2$ , de los dos puntos que iluminan el punto Q, es generalmente pequeña, de manera que los términos de orden más alto, pueden ser despreciados en la ecuación (100) y se puede escribir como:

$$\Delta\phi = (4\pi/\lambda)(\partial d_1/\partial x_2) S_2 \quad (101)$$

Entonces la franjas representan líneas que dependen del término  $(\partial d_1/\partial x_2)$ .

Claramente se observa que la sensibilidad de las franjas se puede variar si la orientación del haz de referencia y el haz del objeto varía y esto altera el valor de  $S_2$ .

La separación, entre franjas en la dirección de  $x_2$  se deduce de la ecuación (101) y se obtiene.

$$\Delta x_2 = 2\pi / (\partial (\Delta\phi) / \partial x_2) = \lambda / (2 (\partial^2 d_1 / \partial^2 x_2) S_2) \quad (102)$$

Se puede observar que la separación entre franjas es constante en regiones de curvatura constante, es decir cuando  $(\partial^2 d_1 / \partial^2 x_2)$  es constante.

La separación entre las franjas en la dirección  $x_3$  es dada por la siguiente ecuación.

$$\Delta x_3 = \lambda/2 \left( \partial^2 d_1 / \partial x_2 \partial x_3 \right) S_2 \quad (103)$$

Cuando la imagen es recorrida una distancia  $S_3$  en una dirección ortogonal a  $S_2$  se obtiene que la separación entre franjas en las direcciones  $x_2$  y  $x_3$  es.

$$\Delta x_2 = \lambda/2 \left( \partial^2 d_1 / \partial x_2 \partial x_3 \right) S_2 \quad (104)$$

y

$$\Delta x_3 = \lambda/2 \left( \partial^2 d_1 / \partial^2 x_2 \right) S_2 \quad (105)$$

Estos son los gradientes de desplazamiento para un interferómetro sensible a desplazamientos fuera de plano.

### III.10 Gradientes de desplazamiento para interferómetros sensibles a desplazamientos en el plano.

El arreglo mostrado en la figura 21 es sensible a desplazamientos en el plano. En este caso el objeto se mueve en el plano  $x_2, x_3$  y es iluminado por los frentes de onda  $U_0'$  y  $U_0''$ , igualmente inclinados con ángulos opuestos,  $\phi$ , a la normal a la superficie  $x_1$ .

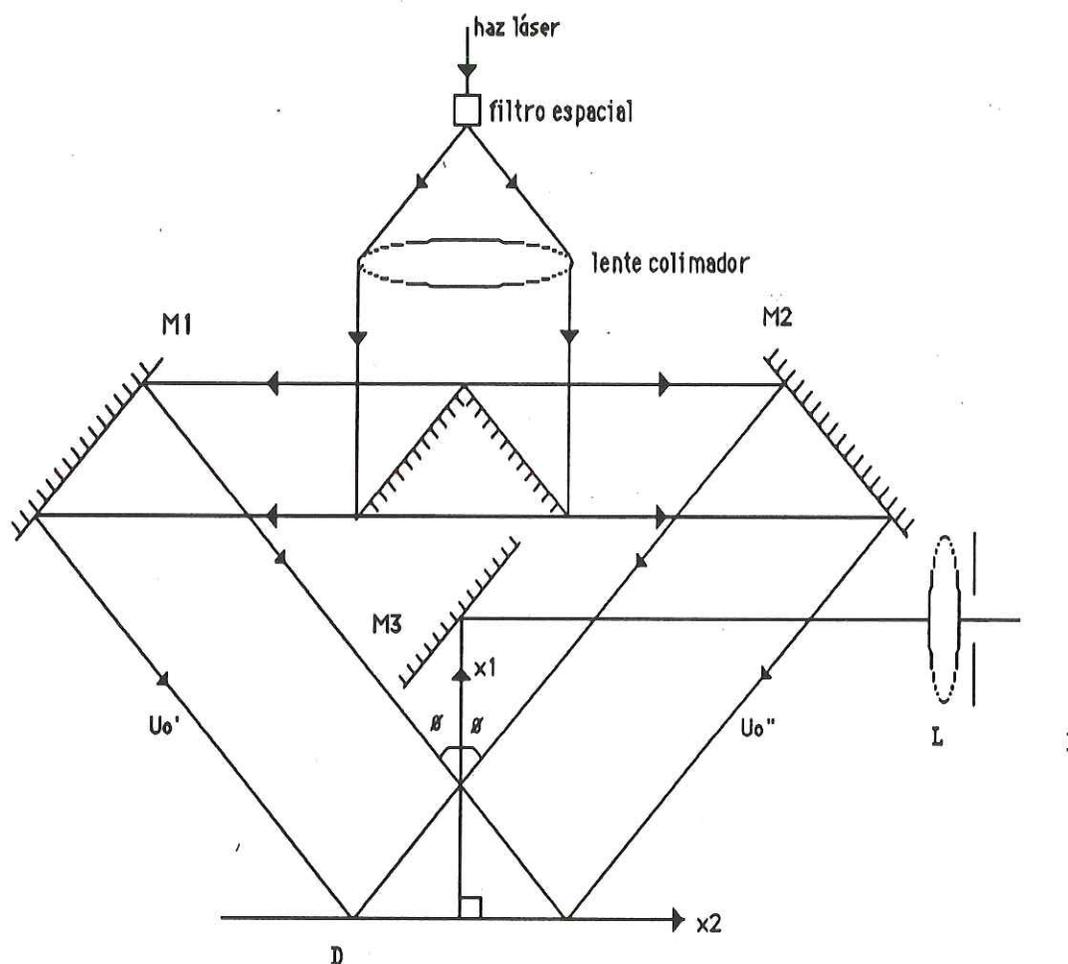


Figura 21. Interferómetro sensible a movimientos en el plano

El eje  $x_1$  pasa a través de la abertura del lente. Cuando el objeto es desplazado una distancia  $d(d_1, d_2, d_3)$ , el cambio relativo de fase es dado por la siguiente ecuación.

$$\Delta\phi = (4\pi/\lambda) d_1 \sin \theta \quad (106)$$

El cambio de fase relativo entre  $U_0'$  y  $U_0''$  es constante sobre planos paralelos al plano  $x_1, x_3$ , entonces los desplazamientos en las componentes  $d_1$  y  $d_3$  no introducen cambios de fase relativa. Para este tipo de interferómetros, los desplazamientos fuera de plano no son observados.

El espacio entre franjas  $\Delta x_2$  en la dirección de  $x_2$  se encuentra en la ecuación (106) dando:

$$\Delta x_2 = 2\pi / (\partial (\Delta\phi) / \partial x_2) = \lambda / (2 \sin \theta d_{22} d_{23}) \quad (107)$$

si se utiliza la misma geometría de iluminación, solamente que el ángulo  $\theta$  estuviera formado con respecto al eje  $x_3$ , la diferencia de fase sería:

$$\Delta\phi = (4\pi/\lambda) d_3 \sin \theta \quad (108)$$

y la separación de las franjas es.

$$\Delta x_3 = \lambda / (2 \sin \theta d_{32} d_{33}) \quad (109)$$

Si la geometría de iluminación fuera tal, que los frentes de onda  $U_0'$  y  $U_0''$  se propagaran en los planos  $x_2, x_1$  y  $x_3, x_1$  respectivamente y a un mismo ángulo con respecto a la normal de la superficie del objeto. Se puede mostrar que (Ek, 1971) :

$$\Delta\phi = (d_2 + d_3) \sin \theta \quad (110)$$

y la separación entre franjas serán.

$$\Delta x_2 = \lambda / \sin \theta (d_{22} + d_{23}) \quad (111)$$

$$\Delta x_3 = \lambda / \sin \theta (d_{33} + d_{32}) \quad (112)$$

## IV CARACTERISTICAS DEL SISTEMA DE ADQUISICION DE IMAGENES.

### IV.1 Introducción:

La correlación de intensidad en el interferómetro electrónico de patrones de moteado, es realizada por un proceso electrónico de sustracción y adición de imágenes. En este capítulo se presentan las características principales del sistema de adquisición de imágenes, los parámetros limitantes de resolución del sistema. Se presentan los tipos de cámara de televisión que se pueden utilizar. También se dan las características de la tarjeta digitalizadora de imágenes utilizada en este proyecto.

### IV.2 Sistema de video.

El sistema de video convierte una imagen formada en el detector de una cámara de televisión en una señal eléctrica y posteriormente esta señal entra a una tarjeta digitalizadora de imágenes y es procesada electrónicamente. El diámetro estándar del tubo de la cámara es de 25mm y el área activa es de 12x10mm, entonces la imagen debe ser reducida a este tamaño. El detector de la cámara tiene una capa de material fotosensible en donde se producen cargas eléctricas que son proporcionales a la intensidad de la imagen.

La superficie del detector es barrida por un haz de electrones que da un voltaje de salida. Después esta señal entra a un sistema de adquisición de imágenes (tarjetas digitalizadoras de imágenes) y de las tarjetas sale una señal de voltaje que modula un haz de electrones que barre la pantalla del monitor,

de manera que las partes más brillantes de la pantalla corresponden a las variaciones de intensidad de la imagen original. Idealmente, el brillo del monitor debe variar linealmente con la intensidad de la imagen original. La resolución exacta entre la intensidad del monitor y de la imagen original es una función complicada del proceso electrónico, cámara de televisión, sistema de adquisición de imágenes y el monitor de televisión. En el despliegue de las franjas por correlación de patrones de moteado, se ha considerado lo siguiente:

- i) El voltaje de salida de la cámara es linealmente proporcional a la intensidad de la imagen.
- ii) El brillo de la imagen en el monitor es proporcional a la salida de voltaje de la cámara.

Este modelo da una buena descripción cualitativa del proceso, sin embargo, se debe entender que una descripción cuantitativa de la visibilidad de las franjas en el ESPI no es posible con esta descripción.

La resolución espacial y el intervalo dinámico del sistema de video es considerablemente menor que en emulsiones fotográficas y holográficas. Estos factores afectan el diseño de los interferómetros que utilizan un sistema de video.

#### **IV.3 Resolución espacial del sistema de video y el efecto en la correlación de patrones de moteado.**

La capacidad del sistema de video para resolver detalles finos en la imagen es, desde luego limitada. Por ejemplo, si se forma una franja brillante y en seguida una franja negra en el detector de la cámara, lo equivalente sería que

esta misma imagen se observara en el monitor de televisión. A medida que el ancho de las franjas formadas en el detector de la cámara se disminuye, el contraste observado en el monitor es menor y cuando el ancho de las franjas es muy pequeño, puede no observarse diferencia de contraste de gris en el monitor.

El límite de la resolución espacial en la cámara de televisión en la dirección vertical está en función del número de líneas de televisión. Un sistema convencional de cámara de televisión tiene 625 líneas de T.V. y una zona activa de  $\sim 13 \times 10$  mm dando una resolución mínima vertical de  $\sim 20 \mu\text{m}$ .

La resolución en la dirección horizontal está en función de la respuesta de frecuencia temporal del sistema de video, que está determinado por el diseño electrónico del sistema (Bohlman, 1979). Comúnmente esta respuesta de frecuencia va de 4Mhz hasta 10Mhz. La frecuencia espacial en la imagen está en función de la frecuencia temporal. Una distribución senoidal de intensidad en el plano imagen da una frecuencia espacial de  $10^6/WNM\text{mm}^{-1}$  donde,

W= ancho de la zona activa del detector de la cámara.

N = número de líneas de T.V.

M= número de imágenes/ segundo.

Para un sistema convencional de televisión, tiene una frecuencia temporal de 1Mhz que corresponde a una frecuencia espacial de  $5\text{mm}^{-1}$  ( $200 \mu\text{m}$ ). Si la frecuencia temporal es de 10Mhz, entonces se obtiene una frecuencia espacial de  $20 \mu\text{m}$  que puede ser tomado como el límite superior de la frecuencia espacial en la dirección horizontal.

Para derivar las ecuaciones dadas en el capítulo III (82) y (89) que describen la variación del brillo en el monitor por una resta y suma de

intensidad de imágenes, se supuso que las variaciones aleatorias  $I_1$  e  $I_2$  son perfectamente resueltas por la cámara de T.V., tanto que la señal de la cámara de un punto dado en la imagen es proporcional a la intensidad en ese punto en el plano imagen, ecuaciones (81) y (86). Esta es una aproximación que es válida cuando la escala de fluctuación de  $I_1$  e  $I_2$  es mayor que la resolución espacial de la cámara. Cuando esto no sucede, el voltaje de salida es una función de la intensidad de la imagen promediada sobre el área de resolución de la cámara y el efecto de esta promediación es reducir la desviación estándar o el contraste en la imagen de salida (Sletteemoen, 1977).

Se ha visto de la ecuación (82) que las franjas de correlación provienen de las variaciones con  $\Delta\phi$  de la desviación estándar de la suma o resta de señales; si se reduce el contraste de una señal individual, la desviación estándar de la señal resultante de la suma o resta de señales también se reduce, y la visibilidad de las franjas por correlación decrece.

Si escribimos la señal que sale hacia la cámara como:

$$V_{TOR} = VD + (V_{corr})_{OR} \quad (113)$$

donde  $VD$  proviene de los términos  $(IO + IR)$  y  $V_{corr}$  proviene de los términos  $2\sqrt{(IOIR)} \cos \psi$ ,  $2\sqrt{(IOIR)} \cos(\psi + \Delta\phi)$ . El término  $VD$  no cambia cuando el objeto se desplaza, éste es un término de ruido. La visibilidad de las franjas se maximiza cuando la desviación estándar de  $V_{corr}$  se maximiza. Podemos escribir el valor de  $V_{corr}$  en un punto  $P$  del plano imagen como:

$$V_{corr}(P) = K < 2\sqrt{(IOIR)} \cos(\psi + \Delta\phi)_{OR} > \Delta A \quad (114)$$

donde  $\Delta A$  es la resolución de la área activa del detector de la cámara,  $K$  es una constante,  $\Delta\phi_O=0$ , y  $\Delta\phi_R= \Delta\phi$ .

Si la variación de  $\psi$  sobre el área de resolución es menor que  $2\pi$ , entonces el valor de  $V_{corr}$  para  $\Delta\phi$  constante varía entre  $\pm[K\sqrt{I_O\sqrt{I_R}}\cos(\Delta\phi)]_{m\acute{a}x}$ . Cuando el valor de  $\psi$  varía más de  $2\pi$  sobre la resolución del área activa de la cámara, el valor de  $V_{corr}$  es de aproximadamente cero y no se observan franjas de correlación.

La distribución de la frecuencia espacial de  $\cos(\psi)$  debe ser tal que su distribución sea resuelta por el sistema de vídeo.

#### IV.3.1 Resolución espacial de un interferómetro con los dos haces de moteado.

Quando dos frentes de onda son patrones de moteado, las intensidades  $I_1$  e  $I_2$  en las ecuaciones (79) y (79) son intensidades aleatorias, y el término de fase  $\psi$  representa la diferencia de fase entre los dos patrones de moteado y puede ser escrito como  $\psi = \psi_{s1} - \psi_{s2}$ . La distribución de frecuencia espacial de  $\psi$  será similar a las de  $\psi_{s1}$  y  $\psi_{s2}$ , y la máxima frecuencia espacial  $f_{m\acute{a}x}$  de las distribuciones  $\psi_{s1}$  y  $\psi_{s2}$  serán determinadas por el diámetro de la abertura de la lente  $a$  (Jones, 1983), y ésto es dado por la ecuación (33).

$$1/f_{m\acute{a}x} = \lambda / a \quad (115)$$

Si el objeto se encuentra a una distancia considerable, se puede asumir que

$l = f$ . El tamaño mínimo del diámetro de una mota  $g_{\text{mín}}$  es dado por:

$$g_{\text{mín}} = 1/f_{\text{máx}} = \lambda(f/a) = \lambda(A.N.) \quad (116)$$

donde A.N. es la abertura numérica de la lente.

Si el punto más pequeño que el sistema de video puede resolver es de  $20\mu\text{m}$  que corresponde a una frecuencia espacial de  $50\text{mm}^{-1}$ , entonces para resolver completamente la frecuencia espacial proveniente de  $\psi_{s1}$  y  $\psi_{s2}$ , es necesario que.

$$(A.N.) > 40 \quad (117)$$

Entonces, se debe de usar una abertura muy pequeña si la escala del patrón de moteado es lo bastante grande para ser completamente resuelto por el video.

Si la abertura numérica se reduce más que este valor, el límite superior de la frecuencia espacial del patrón de moteado incrementa y no será completamente resuelto. Por otro lado, la cantidad de la luz transmitida a través de la lente incrementará y el valor de  $V_{\text{corr}}$  no necesariamente disminuye. Un análisis exacto de la relación entre  $V_{\text{corr}}$  y el diámetro de abertura de la lente es difícil de hacer. El valor óptimo puede ser encontrado en la práctica simplemente ajustando el tamaño de la abertura hasta lograr un máximo contraste en el patrón de moteado.

#### IV.3.2 Resolución espacial de un sistema con haz de referencia suavizado.

En este sistema  $I_1$  es una intensidad aleatoria de moteado, e  $I_2$  es una

intensidad constante en el plano imagen. La diferencia de fase  $\psi$  es dada por.

$$\psi = \psi_O - \psi_R + 2\pi(l_{op} - l_{o'p})/\lambda \quad (118)$$

donde O es la posición del centro de la abertura de la lente, O' es el punto de donde proviene el haz de referencia y P es un punto en el plano imagen. En la figura 22 se muestra este sistema,  $\psi_R$  es la fase del haz de referencia en O' y es constante a través del haz,  $\psi_O$  es la fase aleatoria en O,  $l_{op}$  y  $l_{o'p}$  son las distancias de O y O' a P.

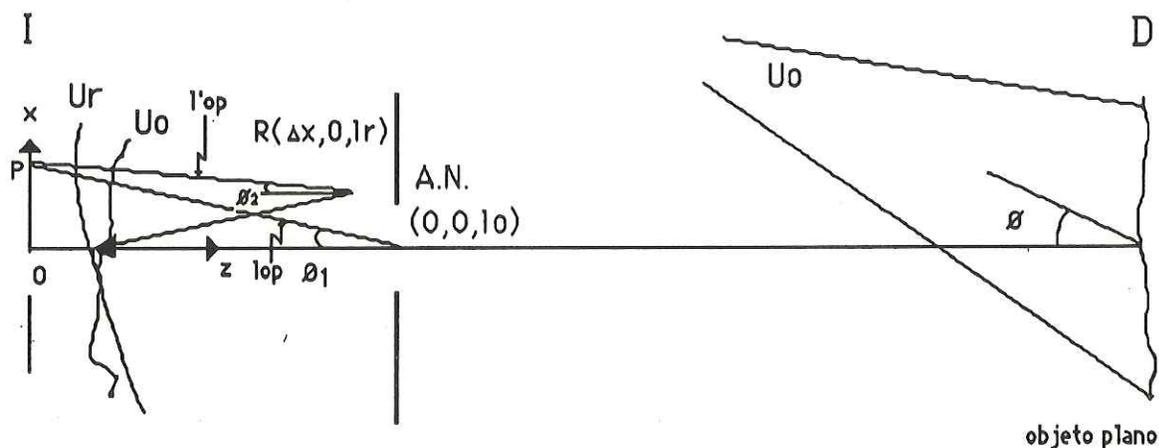


Figura 22. Interferencia con el haz de referencia suavizado.

Por medio de la ecuación (82) se observa que si  $\psi$  varía en  $2\pi$  o más con respecto a la distancia de mínima resolución de la cámara, la señal de correlación  $V_{corr}$  será pequeña (Jones, 1983).

La variación  $\psi_O$  es gobernada por la abertura de la lente, como se observó en el caso cuando los dos haces son de moteado. La variación en el término  $\chi = 2\pi(l_{op} - l_{o'p})/\lambda$  debe ser tal que la variación de  $\chi$  sea menor que  $2\pi$  sobre la resolución de la cámara  $X_r$ .

Si O y O' coinciden,  $\chi$  es cero, si ésto es posible se debe de procurar hacerlo.

Para determinar la separación de tolerancia de estos dos puntos, se considera que las coordenadas de O y O' son (0,0,l<sub>o</sub>) y ( $\Delta x, 0, l_r$ ) donde  $\Delta x, \Delta l \ll l_o$ , donde  $\Delta l = l_o - l_r$ , tenemos:

$$l_{op} - l_{o'p} \approx (l_o + x^2/2l_o) - (l_r + (x - \Delta x)^2/2l_r) \quad (119)$$

cuando despreciamos el segundo término en  $\Delta x$  y  $\Delta l$ , tenemos.

$$l_{op} - l_{o'p} \approx \Delta l - x\Delta x/l_o - x^2 \Delta l/l_o^2 \quad (120)$$

Se puede observar de esta ecuación que un desplazamiento,  $\Delta x$ , de O' con respecto a O produce una variación lineal en  $\psi$  en plano imagen, que varía por  $2\pi$  en intervalos de  $\delta x$  dados por.

$$\delta x = l_o \lambda / \Delta x \quad (121)$$

Para que ésto pueda ser resuelto por el sistema de video,  $\delta x$  debe ser considerablemente más grande que  $X_r$ , entonces.

$$l_o \lambda / \Delta x \gg X_r \quad (122)$$

o

$$\Delta x \ll l_o \lambda / X_r \quad (123)$$

Por ejemplo para una lente que forma la imagen del objeto a una distancia de 100mm y se tiene una resolución espacial en la cámara de  $X_r=20\mu\text{m}$ , tenemos que  $\Delta x \ll 2.5\text{mm}$ .

Una separación longitudinal de los puntos dada por  $\Delta l$  da una variación de  $\psi$  que depende de  $x^2$ . El valor máximo de  $\psi$  ocurre en la orilla del plano imagen. Se puede observar que la distancia  $\delta x$  en que  $\psi$  varía por  $2\pi$  es dada por:

$$\delta x = l_0^2 \lambda / W \Delta l \quad (124)$$

donde  $W$  es el ancho de la zona activa del tubo de la cámara. Para que la imagen pueda resolverse, debemos de tener que:

$$l_0^2 \lambda / W \Delta l \gg X_r \quad (125)$$

o

$$\Delta l \ll l_0^2 \lambda / W X_r \quad (126)$$

para una lente que forma la imagen a 100mm y con una resolución espacial de  $X_r=20\mu\text{m}$ , tenemos que  $\Delta l \ll 24.3\text{mm}$ .

Para optimizar la visibilidad de las franjas de correlación,  $\Delta x$  y  $\Delta l$  deben ser tan pequeñas como sea posible. Se observa que desplazamientos en la dirección lateral producen variaciones más rápidas en  $\psi$  que desplazamientos en la dirección longitudinal.

#### **IV.4 Consideraciones sobre la intensidad de la luz en el interferómetro electrónico de patrones de moteado.**

En esta sección se discutirá como afecta el intervalo dinámico de la cámara a la máxima intensidad del plano y a la intensidad relativa entre el haz de referencia y el haz del objeto. Se tomarán en cuenta para los cálculos el tipo de interferómetro, junto con los ruidos óptico y electrónico del sistema. Las pequeñas aberturas utilizadas para optimizar condiciones de operación, introducen problemas como el que se usen niveles de luz incorrectos o que se excedan los límites de resolución de la cámara de televisión, todo esto puede producir una disminución considerable en el contraste de las franjas.

##### **IV.4.1 Restricciones impuestas por el intervalo dinámico de la cámara.**

Para un tipo de tubo de cámara, una cierta intensidad mínima es requerida para dar un voltaje independientemente del ruido electrónico. Un incremento en la intensidad da un incremento en el voltaje de salida de la cámara hasta que la intensidad llegue al nivel de saturación donde el voltaje de salida permanece constante aun que se siga incrementando la intensidad. La relación de intensidad mínima detectable a la máxima es del orden de  $10^2$  a  $10^3$  (Jones, 1983).

La intensidad del patrón de moteado varía aleatoriamente en el plano imagen y para evitar pérdidas de información en el patrón de moteado, la intensidad total debe ser menor que el nivel de saturación de la cámara. Si el

valor medio y la desviación estándar de intensidad son dados por  $\langle IT \rangle$  y  $\sigma T$ , tenemos que:

$$\langle IT \rangle + 2 \sigma T < I_{\text{sat}} \quad (127)$$

la intensidad de la imagen debe ser menor que el nivel de saturación de la cámara por 95%.

Si la intensidad  $IT$  es dada por:

$$IT = IR + IO + 2\sqrt{IR IO} \cos \psi \quad (128)$$

se puede ver que:

$$\langle IT \rangle = \langle IR \rangle + \langle IO \rangle \quad (129)$$

de las ecuaciones en la sección (II.9) se tiene que:

$$\sigma T^2 = \sigma R^2 + \sigma O^2 + 2 \langle IR \rangle \langle IO \rangle \quad (130)$$

si  $\langle IR \rangle = K \langle IO \rangle$ ,  $\gamma_{OR} = \sigma_{OR} / \langle IO \rangle$  la ecuación (3.13) se puede escribir como.

$$\langle IO \rangle [ 1 + K + 2(\gamma_O^2 + K^2 \gamma_R^2 + 2K)^{1/2} ] < I_{\text{sat}} \quad (131)$$

En las siguientes secciones se discutirá el valor de  $K$  que de un óptimo contraste en las franjas, dependiendo de si las franjas son obtenidas por suma o resta de imágenes y si el haz de referencia es suavizado o no.

#### IV.4.2 Resta de imágenes cuando los dos haces son patrones de moteado.

Cuando restamos imágenes para observar franjas por correlación de intensidad, la intensidad media de la imagen del monitor a lo largo de una línea de constante  $\Delta\phi$  es dada por la ecuación (82) como:

$$B = q | \langle IO \rangle \langle IR \rangle \sin^2 \Delta\phi |^{1/2} + ne \quad (132)$$

o

$$B = q \sqrt{K} \langle IO \rangle | \sin^2 \Delta\phi |^{1/2} + ne \quad (133)$$

donde  $ne$  es el ruido electrónico del sistema de video y  $q = 4K$ . La relación de señal de ruido de las franjas puede ser definido como,

$$RSN = q \sqrt{K} \langle IO \rangle / ne \quad (134)$$

El valor máximo de la relación de señal de ruido se obtiene cuando  $\sqrt{K} \langle IO \rangle$  se maximiza. El valor de esta cantidad es limitado por la ecuación (129). Si escribimos,

$$\langle IO \rangle [ 1 + K + 2(\gamma_O^2 + K^2 \gamma_R^2 + 2K)^{1/2} ] = \rho Isat \quad (135)$$

donde  $\rho < 1$ , tenemos que:

$$RSN = q \sqrt{K} \rho \langle Isat \rangle / [ 1 + K + 2(\gamma_O^2 + K^2 \gamma_R^2 + 2K)^{1/2} ] \quad (136)$$

si los dos haces son moteado, se tiene:

$$\gamma_O = \gamma_R = 1 \quad (137)$$

entonces  $\sigma_{OR} = \langle I_{OR} \rangle$

y 
$$RSN = q \sqrt{K} \rho \langle I_{sat} \rangle / 3(1 + K) \quad (138)$$

se puede observar que RSN se maximiza cuando  $K=1$ ,  $\rho = 1$ . Así, cuando los dos haces son patrones de moteado, en la correlación por resta de imágenes, la intensidad media de los dos haces debe ser igual, y la imagen combinada por los dos patrones, debe ser aproximadamente igual a la intensidad de saturación de la cámara.

#### IV.4.3 Resta de imágenes cuando el haz de referencia es suavizado.

Si  $I_O$  es la intensidad del patrón de moteado, y  $I_R$  es la intensidad del haz de referencia suavizado,  $\gamma_O = 1$ , pero  $\gamma_R$  es típicamente de  $\approx 1/50$ . Evaluando en la ecuación (134) se encuentra que RSN tiene un valor máximo cuando  $K \approx 2$  y  $\rho = 1$ , pero el valor de RSN es relativamente insensible a variaciones de  $K$  y  $\gamma_R$  cuando  $\gamma_R$  es pequeña. Por ejemplo.

$$RSN(K=20) = 0.7 RSN(K=2) \quad (139)$$

La cantidad de potencia del láser requerida para producir un nivel dado de intensidad en el plano imagen del objeto es mucho más grande que aquella requerida para dar la misma intensidad por el haz de referencia suavizado. Si la

potencia disponible del láser es insuficiente para obtener  $K = 2$  y  $\rho = 1$ , se puede escoger un valor más alto de  $K$  que haga operar a la cámara cerca del nivel de saturación, entonces

$$K > 2, \rho = 1 \quad (140)$$

#### IV.4.4 Suma de imágenes cuando los dos haces son patrones de moteado.

Cuando las franjas se obtienen por suma de imágenes, el brillo medio del monitor a lo largo de una línea de  $\Delta\phi$  constante es dado por:

$$B = q \left| \gamma_O^2 + \gamma_R^2 + 8 \langle IO \rangle \langle IR \rangle \cos^2 (\Delta\phi/2) \right|^{1/2} + ne \quad (141)$$

que se puede escribir como:

$$B = q \langle IO \rangle \left| 1 + K^2 + 8K \cos^2 (\Delta\phi/2) \right|^{1/2} + ne \quad (142)$$

los valores máximos y mínimos son:

$$B_{\text{máx}} = q \langle IO \rangle \left| 1 + K^2 + 8K \right|^{1/2} + ne \quad (143)$$

$$y \quad B_{\text{mín}} = q \langle IO \rangle \left| 1 + K^2 \right|^{1/2} + ne \quad (144)$$

y el valor RSN es dado por.

$$RSN = B_{\text{máx}} - B_{\text{mín}} / B_{\text{mín}} \quad (145)$$

La evaluación de la ecuación anterior muestra que RSN tiene un valor máximo cuando  $K=1$ ,  $n_e=0$  y decae rápidamente cuando  $K$  aumenta o disminuye. Estas franjas son de un contraste tan pobre que las franjas de correlación no pueden ser observadas cuando se utiliza este método.

#### IV.4.5 Suma de imágenes cuando el haz de referencia es suavizado.

Con este método el brillo del monitor es dado por:

$$B = q \langle IO \rangle \left[ 1 + K^2 \gamma_R^2 + 8K \cos^2(\Delta\phi/2) \right]^{1/2} + n_e \quad (146)$$

si se supone que  $8K \gg 1 + K^2 \gamma_R^2$ , el brillo máximo se puede escribir como:

$$B_{\text{máx}} = q \langle IO \rangle \sqrt{8K} \quad (147)$$

y RSN se puede escribir como.

$$RSN = \sqrt{8K} / \left[ \left( 1 + K^2 \gamma_R^2 \right)^{1/2} + n_e / q \langle IO \rangle \right] \quad (148)$$

La señal RSN puede mostrar que un valor máximo de  $K \gamma_R = 1$ , y

$$K = (\langle IR \rangle / \langle IO \rangle) \gamma_R = \langle IR \rangle / \sigma_R \quad (149)$$

tenemos que.

$$\langle IO \rangle = \sigma_R \quad (150)$$

El valor medio de la intensidad del patrón de moteado debe ser igual a la desviación estándar o la señal rms de ruido en el haz de referencia(Slettemoen, 1977).

Se puede observar de la ecuación (147) que la magnitud de RSN incrementa a medida que incrementa K. Entonces el ruido óptico en el haz de referencia debe ser minimizado para dar unas franjas mejores.

Para minimizar el término de ruido electrónico,  $n_e/q \langle IO \rangle$  en la ecuación (146), es claro que el valor de  $\langle IO \rangle$  debe ser maximizado. Así,  $\rho$  en la ecuación (134) es igual a la unidad.

Cuando el haz de referencia es suavizado y se está haciendo una suma de imágenes, se deben de hacer las siguientes consideraciones:

- 1) El haz de referencia debe estar libre de ruidos.
- 2) La intensidad media del patrón de moteado( imagen del objeto) debe ser igual al valor rms de ruido del haz de referencia.
- 3) La suma de intensidades debe ser tal que no exceda al nivel de saturación de la cámara.

#### **IV.5 Consideraciones sobre el sistema de video.**

El sistema de video comprende la cámara de televisión, con sistema de adquisición de imágenes, procesamiento de imágenes y el despliegue de la imagen resultante en el monitor de televisión. Lo principal en el sistema de video es obtener máxima visibilidad en las franjas de correlación. El ruido electrónico y en particular el ruido de alta frecuencia deben ser disminuídos. Debido a que el costo de un láser incrementa en proporción a la potencia de

salida, es importante optimizar la sensibilidad del sistema de video.

El valor de  $I_{sat}$  para varios tubos de cámara comerciales son dados en la tabla 1 (Jones, 1981). De éstos, el tubo Isocon tiene la más alta sensibilidad; por lo tanto es mucho más caro que los demás y puede ser usado para la prueba de objetos más grandes cuando la potencia del láser es limitada. Los tubos Chalnicon, Newvicon y Silicon pueden ser usados para el ESPI dando franjas satisfactorias de objetos de 100mm de diámetro usando un láser de 5mW de He-Ne(6).

En este proyecto se emplea una cámara de televisión CCTV modelo HV-725 (Hitachi Com.) con un tubo Newvicon de 650 líneas de televisión y un láser de 10 mW de potencia.

tabla 1. Intensidades de luz de saturación y sensibilidades de tubos de televisión.

tipo de tubo	$I_{sat}$ ( $\mu W cm^2$ )	Sensibilidad relativa
EMI 9677C(Standar Vidicon)	0.53	1
EMI 9877M(Standar Vidicon)	0.59	0.9
RCA 4542 (Long-lag tube)	0.08	6.6
Thomson 7H9828 (Silicon Target)	0.21	2.5
RCA 4532 (Silicon Target)	0.24	2.2
Mullar XQ 1440 (Newvicon)	0.18	2.9
Isocon	0.005	$\approx 100$

Las medidas de sensibilidad son en  $\lambda = 633$  nm de un láser de He-Ne.

La parte más sensible al ruido del sistema de procesamiento, es la primera etapa de amplificación de la señal de video que es llevada a cabo por los

amplificadores de la cámara, esta sección debe ser cuidadosamente diseñada.

Se ha visto que el tamaño de la señal de correlación y entonces la RSN de las franjas es una función de la resolución espacial del sistema de video, y la RSN se maximiza si la resolución espacial se maximiza. La resolución vertical es determinada por el número de líneas de T.V.. La respuesta a la frecuencia del sistema debe ser tal que la resolución espacial horizontal sea tan buena como la resolución vertical.

Cuando las franjas de correlación son observadas usando sustracción de imágenes, es necesario saber la frecuencia que la cámara envía la imagen. Si esto no es hecho con un alto grado de precisión puede ocurrir una pérdida de correlación. Es necesario saber con que frecuencia la cámara de televisión proporciona una imagen a las tarjetas digitalizadoras, de tal manera que pueda correlacionarse la imagen del objeto antes de moverse y la imagen del objeto después de moverse, es decir, que el objeto no haya sufrido un desplazamiento muy grande de tal manera que no se pueda hacer la correlación de las imágenes.

#### IV.6 Características del sistema digitalizador de imágenes.

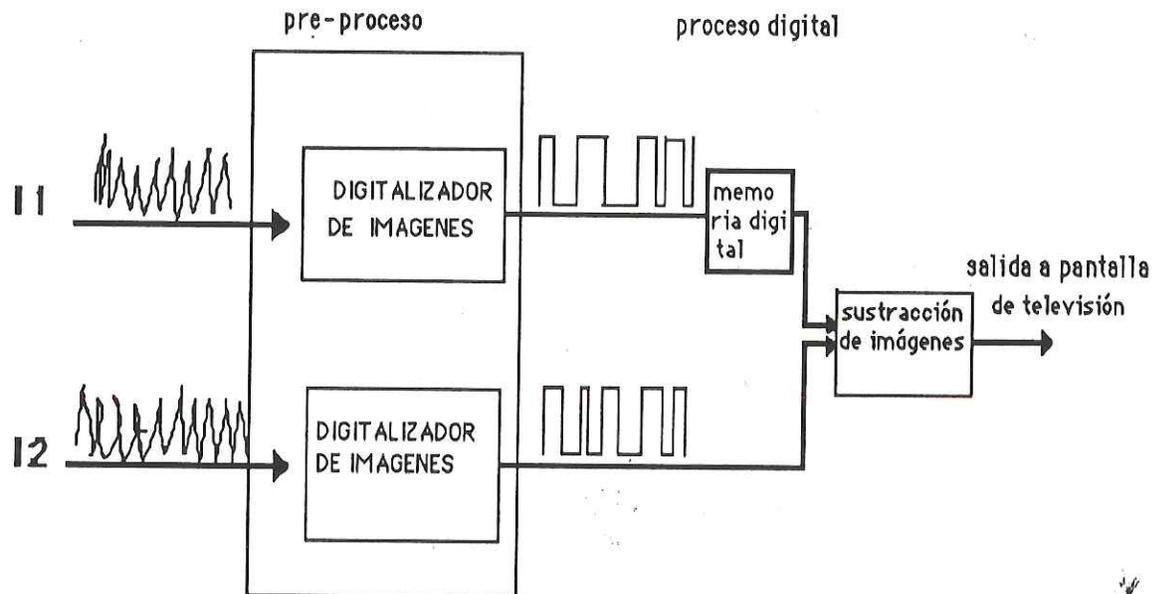


Figura 23. Proceso de adquisición y correlación de imágenes

La figura 23. muestra el proceso de adquisición y correlación de imágenes. La señal I1 es la imagen del patrón de moteado de un objeto, esta señal es electrónicamente digitalizada y guardada en una memoria digital. La señal I2 es la imagen del patrón de moteado del mismo objeto, después de haberse movido, esta señal es también electrónicamente digitalizada y estas dos imágenes se correlacionan punto por punto (sustracción de imágenes) y la imagen resultante da un patrón de franjas, el cual, proporciona información del movimiento del objeto.

Para hacer el proceso de digitalización de imágenes se está utilizando la tarjeta digitalizadora de imágenes a alta resolución DT2851 para la IBM PC AT. y una tarjeta auxiliar de procesamiento de imágenes DT2858.

#### IV.6.1 Características de la tarjeta DT2851.

La tarjeta DT2851 digitaliza imágenes a una alta resolución, tiene ocho tablas alteradoras de despliegue( look-up en inglés, modifican la señal de entrada y salida a las tarjetas) de entrada de 256 por 8-bit de RAM, dos memorias de alta velocidad de 512 por 512 localidades de memoria de 8 bits, ocho tablas alteradoras de despliegue 256 por 24 bits para salida y tres salidas de video RGB de 8 bits (cada una para el rojo, verde y azul). La tarjeta DT2851-60Hz digitaliza señales de entrada RS-170, RS-330, NTSC (16).

La tarjeta DT2851 digitaliza imágenes a razón de 1/30 de segundo. La entrada de video es señal acoplada-ac, y entonces se convierte a una señal dc. Se utiliza un filtro de 3.58Hz para remover la entrada de color y cromaticidad presentes en señales NTSC y PAL. Esta información de color si no se remueve propiciará patrones de interferencia. La señal de video es convertida a una razón de 10MHz en una matriz de 512 líneas por 512 elementos de imagen (pixels en inglés) con una resolución de 8 bits por elemento de imagen. La información de 8 bits para cada elemento de imagen representa 256 niveles de gris posibles.

La entrada de 8 bits se manda a través de una de las tablas de entrada alteradoras de despliegue programable almacenada en localidades de RAM. Estas tablas de entrada alteradoras de despliegue son utilizadas para el proceso LUT, también para la señal de entrada de video, y para señal de entrada a tarjetas auxiliares de procesamiento.

Las dos imágenes almacenadas en memorias de 512 por 512 por 8 bits pueden ser accesadas de una manera normal por el ducto de la IBM PC AT. Estas memorias son seleccionables para ocupar cualquiera de los 32 bloques de memoria de 512 bytes dentro del espacio de 16 Mbytes de la IBM PC AT.

Las dos matrices de memoria, son mapeadas en memoria, en el espacio de memoria de la IBM PC AT. y puede ser accesado en cualquier tiempo usando instrucciones normales de memoria. Las operaciones de las matrices de memoria son controladas por circuitos de tiempo arbitrarios. La entrada de video, salida de video, y acceso normal a memoria se puede hacer de una manera simultánea.

La siguiente figura 24 muestra el diagrama de bloques para la tarjeta DT2851. Tiene dos puertos de video externos. Estos puertos pueden ser usados para transferir datos de video, en forma de entrada y salida de las matrices de memoria, a la velocidad de video, usando dos formas de encadenamiento manual (handshanking en inglés) asincrono. El DT2851 puede acceder video de alta velocidad a través de estos puertos.

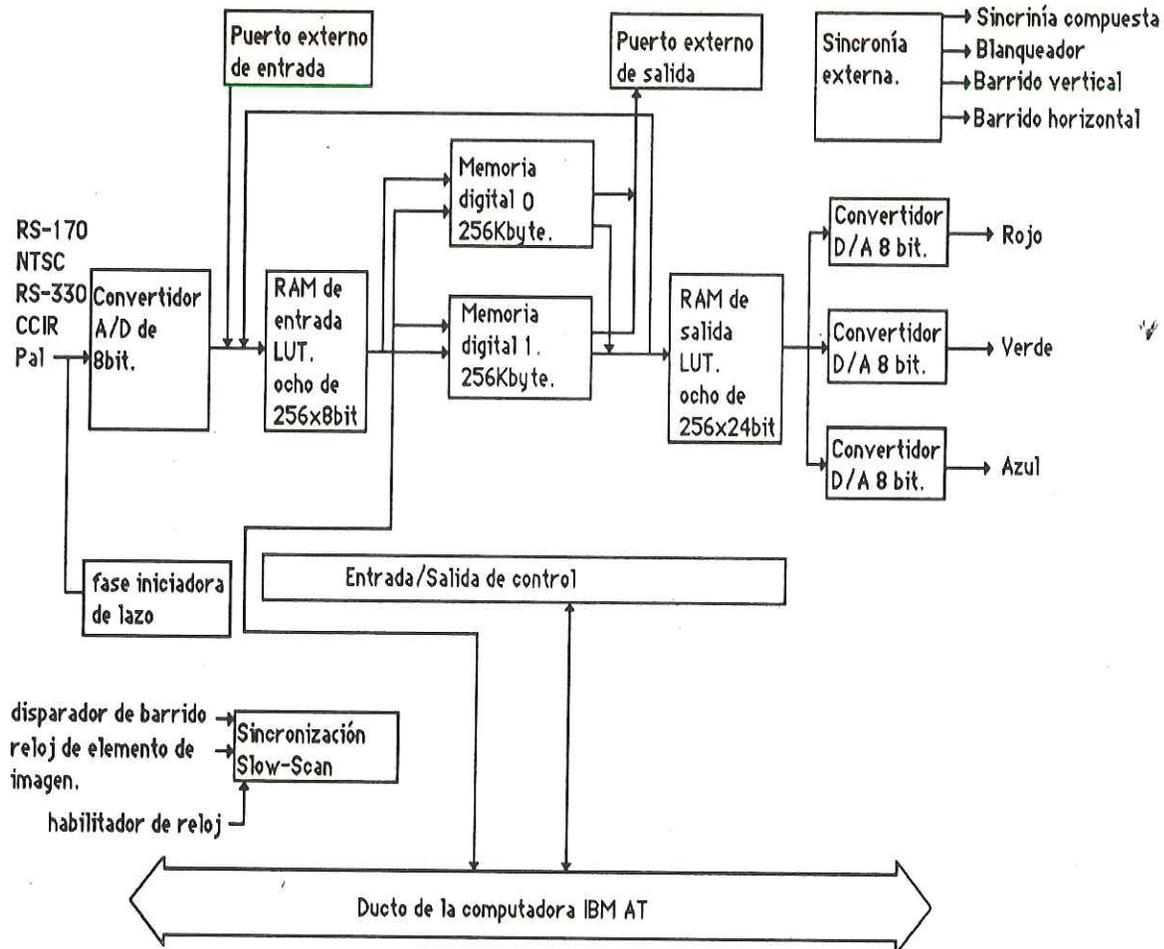


Figura 24. Diagrama de bloques de la tarjeta digitalizadora.

La tarjeta DT2851 puede ejecutar operaciones de procesamiento aritmético y lógico a un tiempo real, estas operaciones incluyen AND, OR, XOR, promediación, suma, resta, división. Estas operaciones se ejecutan por medio del uso de las tablas de memoria alteradoras de despliegue (LUT). El proceso LUT consiste de una trayectoria de retroalimentación que permite que una matriz de datos de cada matriz de memoria sea operado bajo el mando de una de las tablas de 256 por 8 bits de 1 LUT, y regresar a cada una de las matrices de memoria y los

despliega todos en 1/30 segundos.

Ocho tablas de salida de 256 por 24 bits de RAM, define ocho sets de atributos (intensidad y color) de salida para cada una de los 256 bytes posibles que pueden estar contenidos en una memoria de 8 bits. Esto permite ocho sets independientes de 256 atributos posibles a escoger de 16 millones de atributos posibles para uso de salida.

El DT2851 hace uso de ocho registros de 16 bits de salida para controlar y condicionar. La dirección de entrada/salida base es seleccionable a una de las 16 direcciones dentro del espacio de memoria de entrada/salida de la IBM PC AT.

#### IV.6.2 Arquitectura y principios de programación.

La matriz de memoria consiste de dos memorias consecutivas de 256 kbytes que ocupan 512 Kbytes de espacio de memoria direccionables en la IBM PC AT. La memoria puede ser accesada en cualquier tiempo usando operaciones de acceso a memoria de 8 bits o 16 bits para la IBM PC AT (User Manual, 1988).

El orden para que una computadora procese una imagen es el siguiente: primero, trasladar la señal de la cámara de video a notación numérica. Este proceso de traslación es llamado digitalización. La imagen es subdividida en una matriz de líneas horizontales, cada una con sus correspondientes elementos de imagen.

La dirección base de memoria contiene el valor digitalizado para el elemento de imagen izquierdo de la primera línea. Las siguientes 511 direcciones contienen los siguientes valores para cada elemento de imagen de la línea. La dirección base de memoria contiene las 512 direcciones de la

primera línea, y así sucesivamente. El primer elemento de imagen de la matriz de memoria está localizado en la dirección base de memoria 266,144. Este arreglo de memoria es el mismo si la adquisición de video es hecha interlazada o no. En una adquisición interlazada, las líneas pares (0, 2, 4, ...,) son digitalizadas en el primer paso y las líneas impares (1,3,5,.....) son digitalizadas en los siguientes pasos. Pero la matriz de memoria contiene las líneas en orden.

La tarjeta DT2851 tiene la capacidad de memoria para almacenar imágenes de 512 por 512 elementos de imagen. Pero el formato de video para RS-330, RS-170 y NTSC hace que se desplieguen sólo 480 líneas por 512 elementos de imagen.

Cada elemento de imagen tiene una dirección representada por el número de la línea y el número de columnas para ese elemento de imagen. El brillo de la imagen en esa localidad es proporcionado por el convertidor A/D tipo Flash. Esta operación permite que cada elemento de imagen sea identificado por un número que representa el valor de brillo de elemento de imagen en esa localidad. Cuando se digitaliza a todos los elementos de imagen, la imagen entera puede ser representada por un arreglo rectangular de enteros. Esta representación de imagen puede ser procesada por la tarjeta DT2851, o almacenada en memoria para después recobrarla y procesarla.

La matriz de almacenamiento de memoria tiene dos puertos externos de entrada de video (uno para entrada y otro para salida), que pueden ser usados para transferir asincrónicamente datos de video dentro y fuera de la matriz de almacenamiento de memoria. Estos puertos pueden ser usados como interfase para otras tarjetas procesadoras de imagen.

En un proceso LUT existe la posibilidad que una matriz de datos pueda ser

leída de cualquiera de las dos matrices de memoria, puede también ser transformada por la tabla de entrada alteradoras de despliegue, y escrita en cualquiera de las dos matrices de memoria. Esto proporciona un procesamiento de imagen en tiempo real.

## V RESULTADOS EXPERIMENTALES.

### V.1 Introducción:

En este capítulo se presentan los resultados experimentales usando técnicas de procesamiento digital de imágenes. Para esto se muestra el sistema óptico que se utilizó en la obtención de franjas de correlación por desplazamientos fuera de plano y vibraciones. Se discute el uso de la técnica de procesamiento digital de imágenes en el interferómetro electrónico de patrones de moteado. La técnica del proceso digital de imágenes genera franjas por correlación de intensidad con un alto contraste. También se presentan las imágenes con franjas por correlación de intensidad obtenidas para movimientos fuera de plano.

### V.2 Descripción del sistema óptico para la observación de desplazamientos fuera del plano.

En la figura 25 se muestra el interferómetro electrónico de patrones de moteado con el que se trabajó para la detección de movimientos fuera de plano. El sistema de procesamiento digital de imágenes consiste de dos tarjetas las cuales se describen en el capítulo 3. En términos generales consiste de un convertidor analógico-digital de alta velocidad, dos matrices de memoria digital, las tarjetas tienen capacidad para hacer restas y sumas de imágenes, realce de contraste arbitrario, realce de contraste lineal y no lineal. El procesamiento digital, también contiene un convertidor digital-analógico para proporcionar

la señal al monitor de televisión.

En la figura 25 se muestra el arreglo utilizado en el desarrollo de este trabajo. La luz que sale de un láser de He-Ne de 10mW es dividida por un divisor de haz (1) para producir el haz del objeto (2) y el haz de referencia(3), la luz del haz de referencia es expandida por un objetivo de microscopio (4) y reflejada en un divisor de haz (5), la luz que se refleja en el divisor de haz incide en el detector de la cámara de T.V.(6). La luz del haz del objeto es expandida por un objetivo de microscopio (7) y dirigida hacia un objeto con superficie plana difusora (8). La luz que difracta el objeto es colectada por una lente (9) y la imagen del objeto es formada en el detector de la cámara.

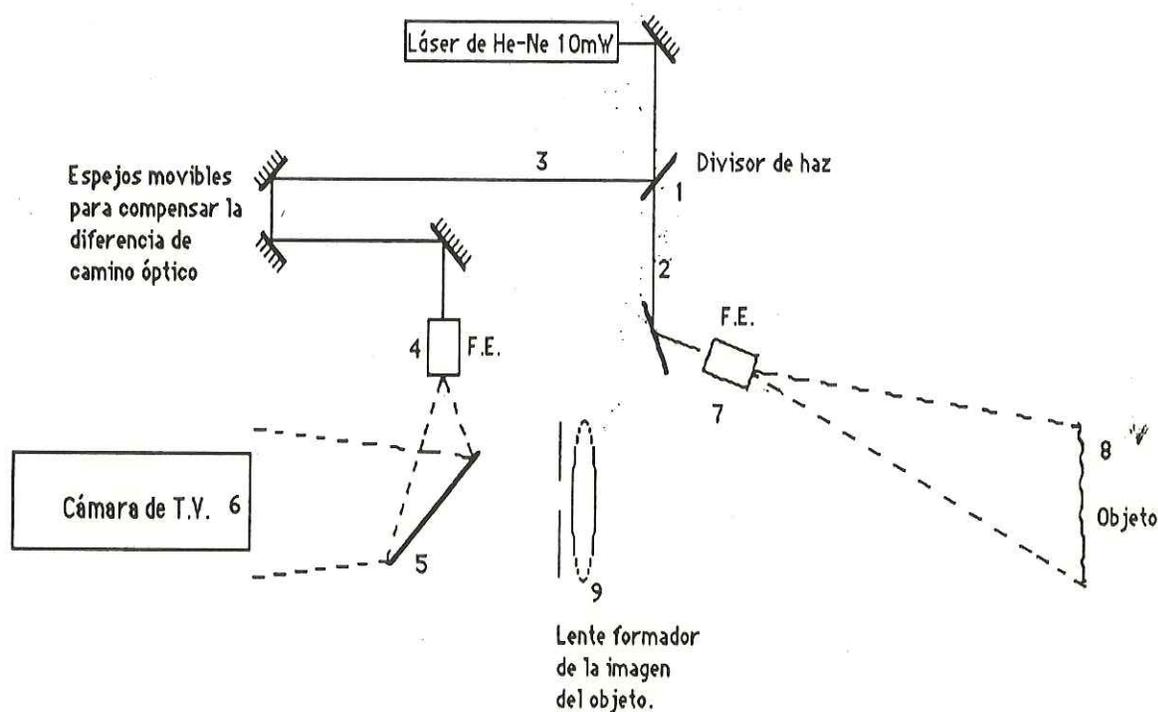


Figura 25. Arreglo del interferómetro electrónico de patrones de moteado utilizado en el desarrollo de este trabajo.

Para producir franjas por correlación de intensidad, se captura la imagen del patrón de moteado del objeto por medio de la cámara de T.V. y la cámara de T.V. manda una señal eléctrica y esta señal es convertida en una señal digital por medio de un convertidor analógico-digital de 8 bits de resolución, creando así, una imagen que se almacena en una matriz de memoria digital de 512 x 512 elementos de imagen con 256 niveles de intensidad digital.

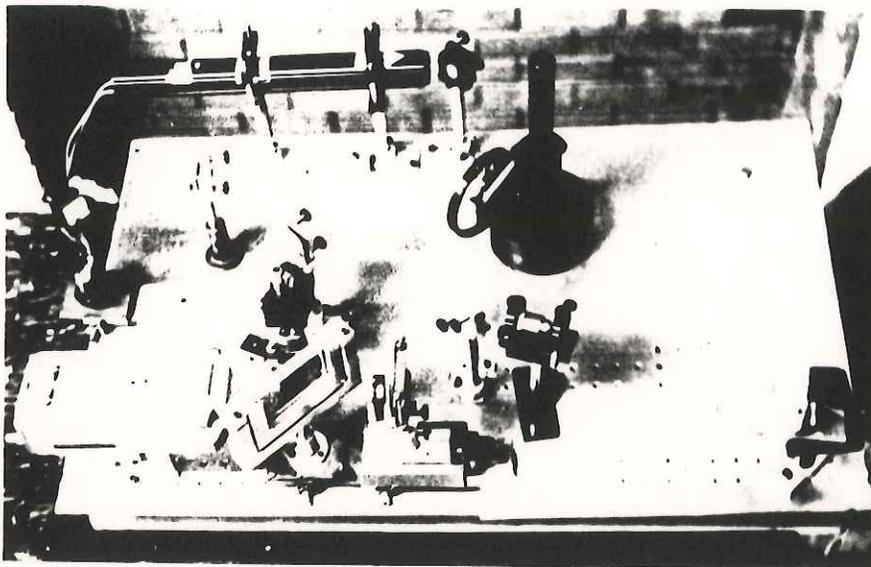


Figura 26. Fotografía del interferómetro utilizado en el desarrollo de este trabajo.

Después que el objeto ha sufrido algún desplazamiento, la imagen digital del objeto desplazado es restada de la imagen digital almacenada en memoria, y la imagen resultante es almacenada en memoria. Esta imagen almacenada se

sujeta punto por punto a un procesamiento digital de imagen no lineal, como por ejemplo: un realce de contraste arbitrario y posteriormente convertirse en la entrada a un monitor de televisión. Las franjas de interferencia desplegadas por el monitor de televisión, representan desplazamientos del objeto. En la siguiente figura 27 se muestra la computadora IBM AT y el monitor de televisión utilizados para este trabajo.

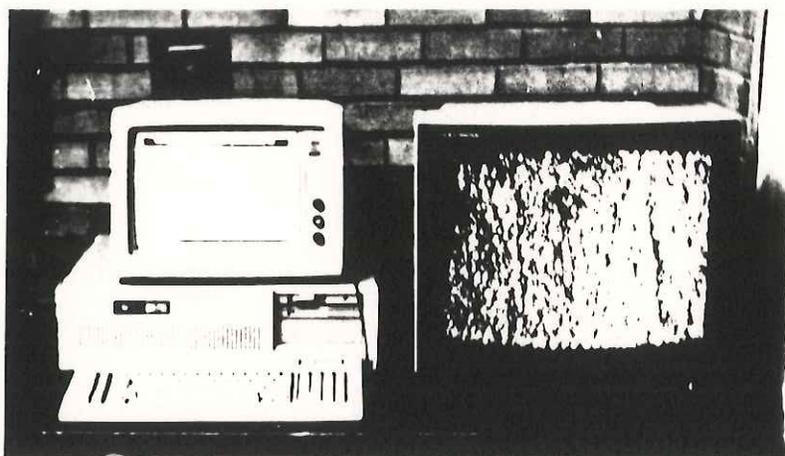


Figura 27. Computadora IBM AT y monitor de televisión usados en este proyecto.

El sistema de procesamiento de imágenes utilizado en este trabajo, tiene muchas funciones: (1) suma y promediación de imágenes; (2) resta de una imagen con otra almacenada en memoria; (3) realce de contraste no lineal, lineal y arbitrario; (4) filtrado de imágenes, con filtros pasa bajos, pasa altos,

laplaciano. Con este tipo de procesamiento digital, se tiene la ventaja de que la imagen resultante (con franjas de correlación) puede procesarse punto por punto en varias formas. Se puede hacer un proceso de realce de contraste lineal, o realce de contraste arbitrario y posteriormente convertirse a una señal análoga de tal manera que sea la señal de entrada a un monitor de televisión. En la figura 28 se muestran esquemas del procesamiento digital.

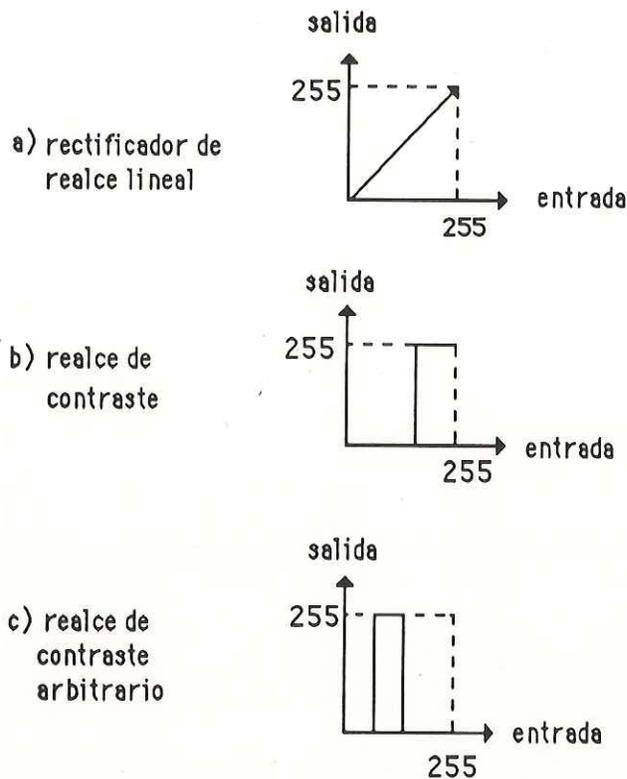


figura 28  
Representación esquemática del procesamiento digital de la imagen resultante (con franjas de correlación)

Con este tipo de funciones de procesamiento digital de imágenes se pueden obtener franjas de alto contraste que representan desplazamientos del objeto y modos de vibración.

### V.3 Medidas del desplazamiento fuera del plano.

El arreglo utilizado para la observación de desplazamientos fuera de plano es el ya mostrado en la figura 25. Se utiliza una cámara de T.V. CCTV modelo HV-725 (Hitachi Corp.). La resolución de esta cámara es de 650 líneas de resolución en la parte central del detector de la cámara. Esta cámara utiliza un tubo Newvicon con una zona activa de 13x10mm, entonces la resolución espacial es de 20.5  $\mu\text{m}$ . El monitor utilizado es modelo PVM-1910 (SONY Corp.) con entrada RGB y señal de video compuesto y 350 líneas de televisión. El objeto utilizado fue una placa de aluminio vertical de 80mm de ancho por 100mm de largo y de un espesor de 2mm. La relación de intensidades es de dos veces la intensidad del haz de referencia con respecto a la intensidad del haz del objeto, de tal manera que la intensidad resultante es aproximadamente la intensidad de saturación de la cámara de televisión utilizada. Esto se hizo para cumplir con las condiciones dadas en la ecuación 140.

Es importante señalar que una de las cosas que se debe de cuidar al alinear este tipo de interferómetro, son los parámetros  $\Delta x$  y  $\Delta l$  dados en las ecuaciones 123 y 126 respectivamente. Estas diferencias de posición entre el punto donde diverge el haz de referencia y el punto central del diafragma de la lente que forma la imagen del objeto, deben ser lo más pequeñas posibles. Esto hace que la frecuencia espacial de la interferencia de los dos haces aumente y el detector de la cámara pueda captar la interferencia entre la imagen del objeto y el haz de referencia. De no cumplirse las condiciones en las ecuaciones anteriormente dichas, es imposible producir los interferogramas, que se

muestran a continuación, de un tipo de interferómetro con el haz de referencia suavizado.

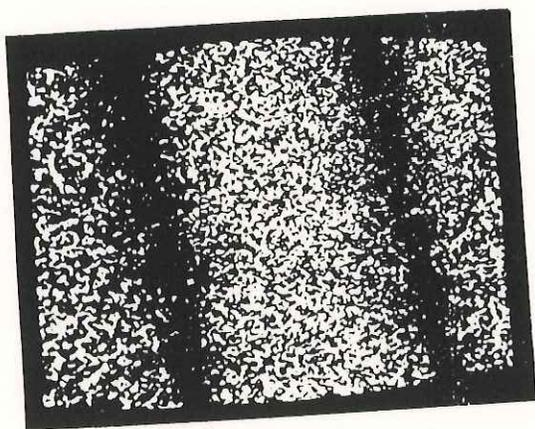
### V.3.1 Imágenes obtenidas para movimiento fuera del plano con procesamiento digital.

La placa de aluminio se colocó a 39.5 cm de distancia con respecto a la lente que forma la imagen en el detector de la cámara. El área captada por el detector de la cámara es de 18.5 x 18.5 mm y el tamaño del moteado es de 42  $\mu\text{m}$ . Los desplazamientos del objeto fueron hechos por medio de un micrómetro que a la vez de mover el objeto medía cuanto lo había desplazado.

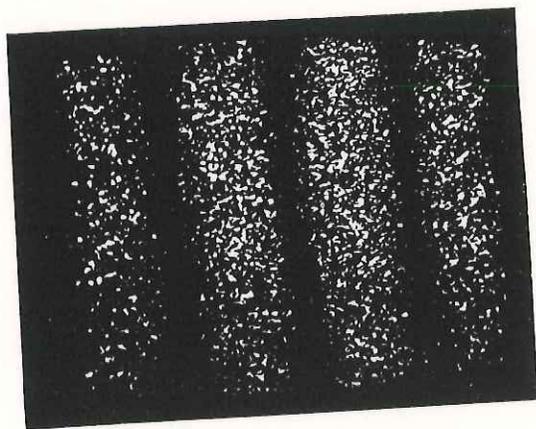
Para hacer la correlación de imágenes de patrones de moteado, se realizó un programa computacional cuyo algoritmo es el siguiente: primero, se digitaliza una imagen del objeto y esta imagen se guarda en una matriz de memoria de 512 x 512 elementos de imagen; después, se espera 5 segundos para dar tiempo a mover el objeto por medio del micrómetro; después, se toma otra imagen del objeto ya desplazado y se almacena en otra matriz de memoria de 512 x 512 elementos de imagen; por último, se procede a hacer la resta de imágenes punto por punto. La imagen resultante de la resta de los dos patrones de moteado fue sometida a un procesamiento de imagen por medio de un realce de contraste arbitrario. Lo que se hizo, para obtener las imágenes resultantes mostradas en la siguiente figura 29, fue tomar el rango de [10, 255] de intensidades digitales igual a 255 correspondiente a un blanco, y el rango [0, 9] de intensidades igual a 0 correspondiente a un negro en la pantalla. Este realce de contraste fue el óptimo que se encontró para obtener estas franjas.

El programa computacional fue hecho en el lenguaje del paquete IRIS-TUTOR que es el que maneja las tarjetas digitalizadoras de imagen DT2851 y DT2858. Este programa se muestra en el listado 1 mostrado al final de este capítulo. Para hacer el realce de contraste arbitrario, se hizo también un programa computacional que se muestra en el listado 2.

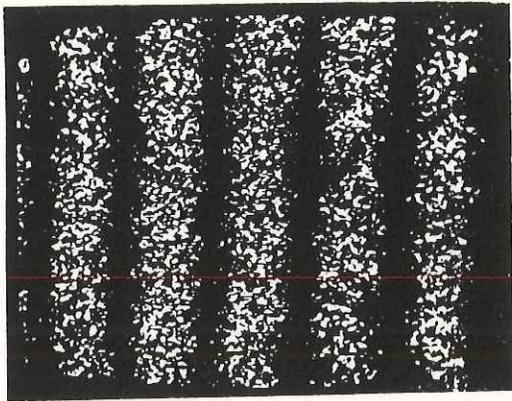
A continuación se presentan las imágenes obtenidas con franjas de correlación tomadas directamente del monitor de televisión.



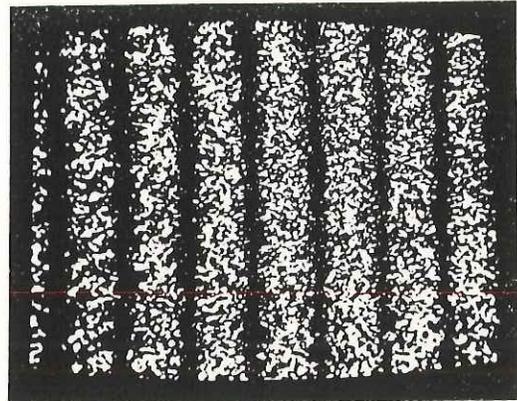
(a)



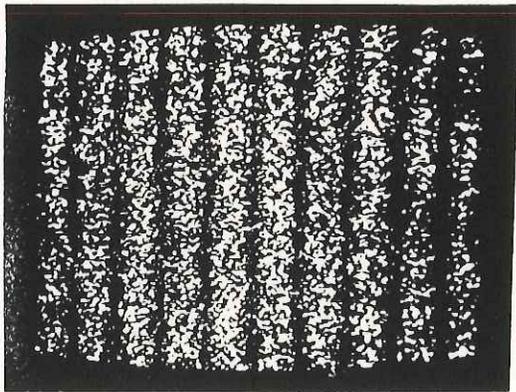
(b)



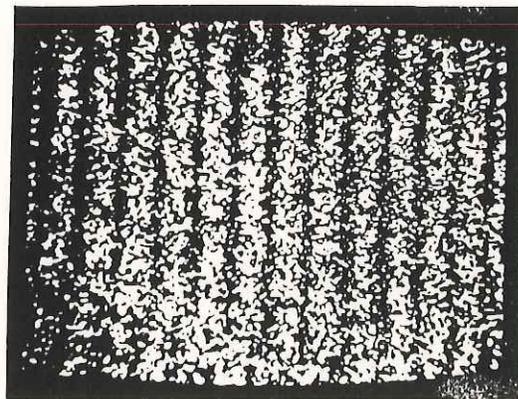
(c)



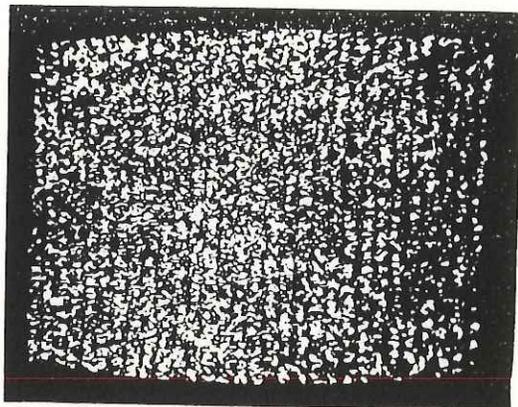
(d)



(e)



(f)



(g)

Figura 29. Patrones de franjas por correlación de intensidad para movimientos de objeto fuera de plano sometidos a un realce de contraste arbitrario, haciendo blanco desde el nivel 10 de intensidad digital.

Las fotografías anteriores muestran un patrón de franjas por correlación de intensidad obtenidas por una resta de imágenes. Como se observa es una función  $\sin^2$  dada por la ecuación 2.33.

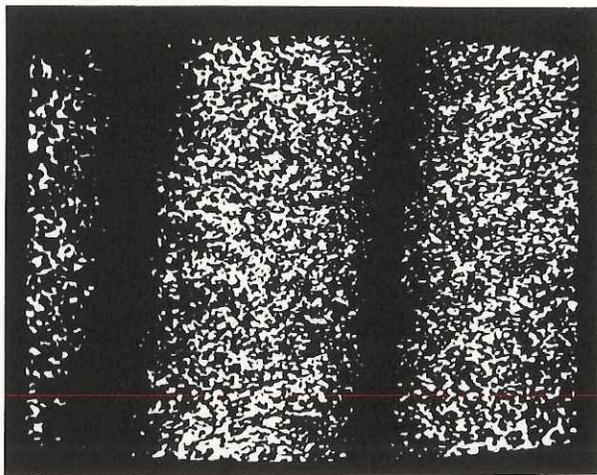
En la fotografía (a) se observa un patrón de 2 franjas negras para un movimiento de  $2.54\mu\text{m}$ . En la fotografía (b) se observa un patrón de 3 franjas negras para un movimiento de  $5.01\mu\text{m}$ . En la fotografía (c) se observa un patrón de 5 franjas negras para un movimiento de  $6.35\mu\text{m}$ . En la fotografía (d) se observa un patrón de 7 franjas negras para un movimiento de  $12.7\mu\text{m}$ . En la fotografía (e) se observa un patrón de 9 franjas negras para un movimiento de  $15.24\mu\text{m}$ . En la fotografía (f) se observa un patrón de 13 franjas negras para un movimiento de  $19.05\mu\text{m}$ . En la fotografía (g) se observa un patrón de 30 franjas

negras para un movimiento de  $25.4\mu\text{m}$ .

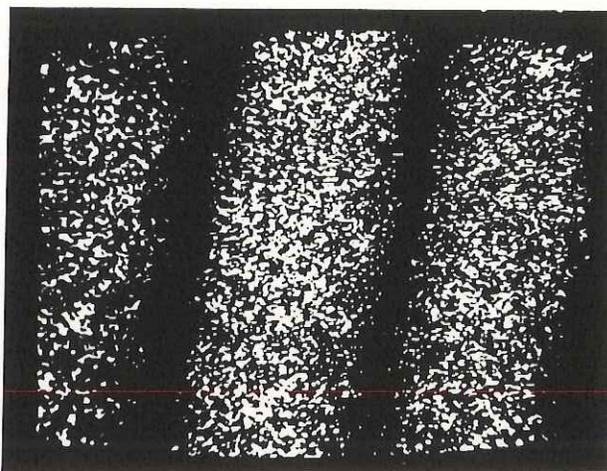
Se puede ver en las fotografías anteriores que entre menor es el número de franjas, menor es el desplazamiento que sufrió el objeto y entre más franjas haya, el desplazamiento es mayor. En la fotografía (g) se puede ver que las franjas se empiezan a perder, ésto indica que para desplazamientos mayores las dos imágenes restadas ya no se correlacionan. El rango dinámico en este interferómetro es de  $2.5\mu\text{m}$  a  $25.4\mu\text{m}$  para desplazamientos puros fuera de plano y la cantidad de franjas que se pueden formar es de 1 hasta 36 franjas, mas de treinta y seis franjas ya no se alcanzan a distinguir bien. La cantidad de franjas podría aumentar si se utiliza un monitor de mayor resolución.

### **V.3.2 Imágenes obtenidas para movimientos fuera del plano con desplazamiento giratorio horizontal.**

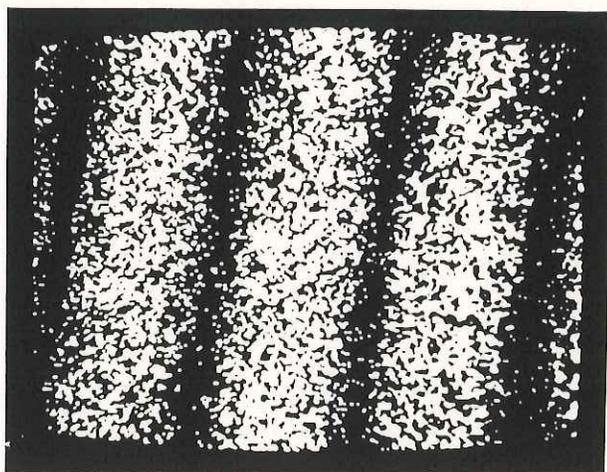
Con el interferómetro mostrado en la figura 25, se obtuvieron las imágenes mostradas en la siguiente figura 30. La forma en que se hizo este experimento, fue girando la placa de aluminio con respecto a un eje vertical posicionado en la parte central de la placa cuyo ancho es de 80mm. La placa se montó sobre un disco giratorio de 30mm de radio y este disco se movió por medio de un micrómetro colocado en la orilla del disco. El área del objeto captada por el detector de la cámara es de 18.5 x 18.5 mm. A las imágenes mostradas en la siguiente figura, también se les hizo el mismo realce de contraste arbitrario a partir del nivel 10 de intensidad digital. El tamaño del moteado que llega al detector de la cámara es de  $42\mu\text{m}$ .



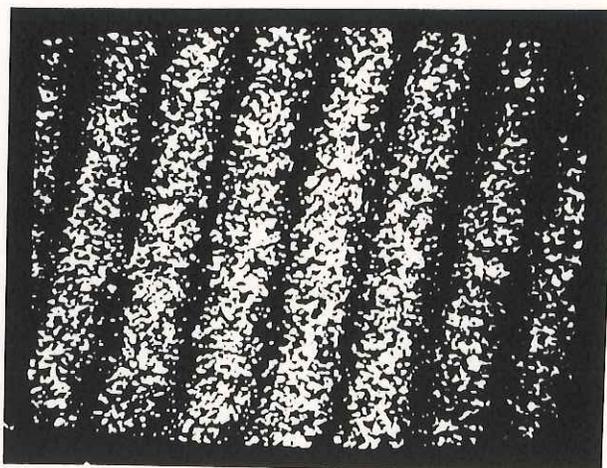
(a)



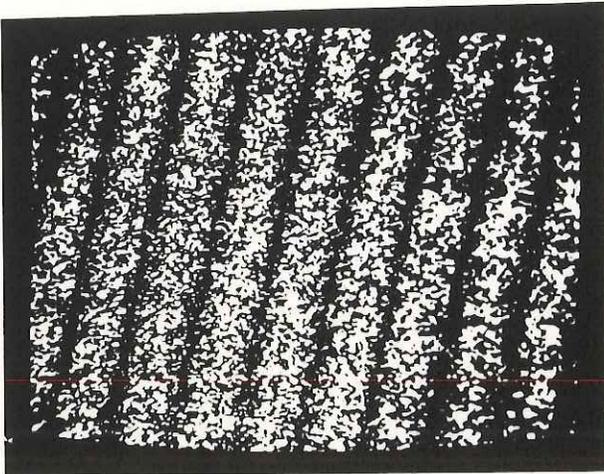
(b)



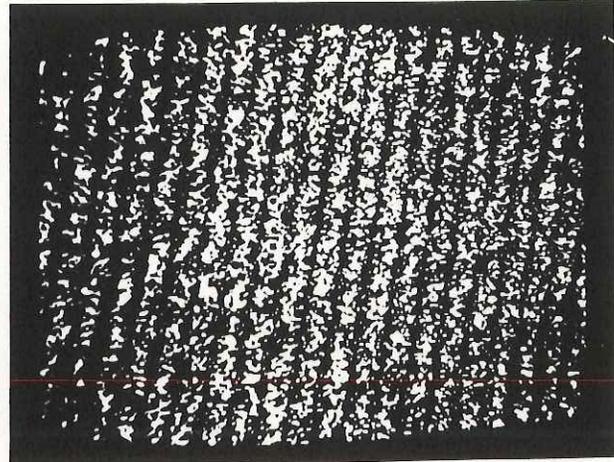
(c)



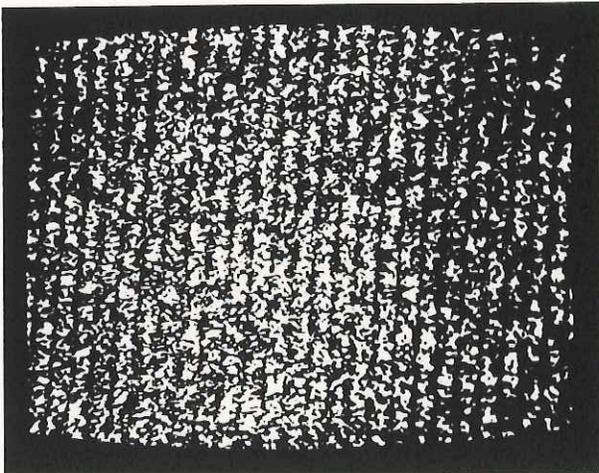
(d)



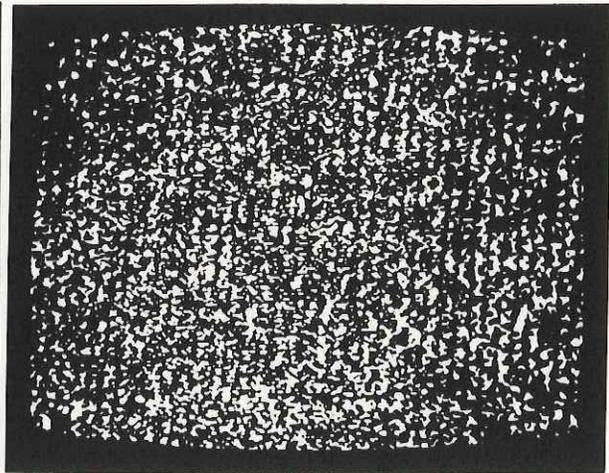
(c)



(f)



(g)



(h)

Figura 30. Patrones de franjas por correlación de intensidad para movimientos de objeto fuera de plano con desplazamiento giratorio horizontal, sometidos a un realce de contraste arbitrario, haciendo blanco desde el nivel 10 de intensidad digital.

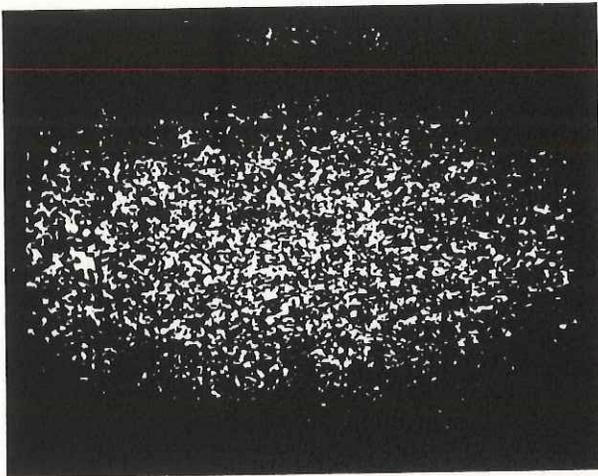
Como puede observarse en las fotografías anteriores, las franjas que se obtuvieron tienen un corrimiento en la parte baja del monitor de televisión. También como en el experimento anterior, entre menor sea el número de franjas, menor es el desplazamiento giratorio horizontal que ha sufrido el objeto.

En la fotografía (a) se observa un patrón de 2 franjas negras para un movimiento de  $2.54\mu\text{m}$ . En la fotografía (b) se observa un patrón de 3 franjas negras para un movimiento de  $3.81\mu\text{m}$ . En la fotografía (c) se observa un patrón de 3 franjas negras para un movimiento de  $5.08\mu\text{m}$ . En la fotografía (d) se observa un patrón de 7 franjas negras para un movimiento de  $7.65\mu\text{m}$ . En la fotografía (e) se observa un patrón de 9 franjas negras para un movimiento de  $10.16\mu\text{m}$ . En la fotografía (f) se observa un patrón de 21 franjas negras para un movimiento de  $15.24\mu\text{m}$ . En la fotografía (g) se observa un patrón de 25 franjas negras para un movimiento de  $19.05\mu\text{m}$ . En la fotografía (h) se observa un patrón de 36 franjas negras para un movimiento de  $30.5\mu\text{m}$ .

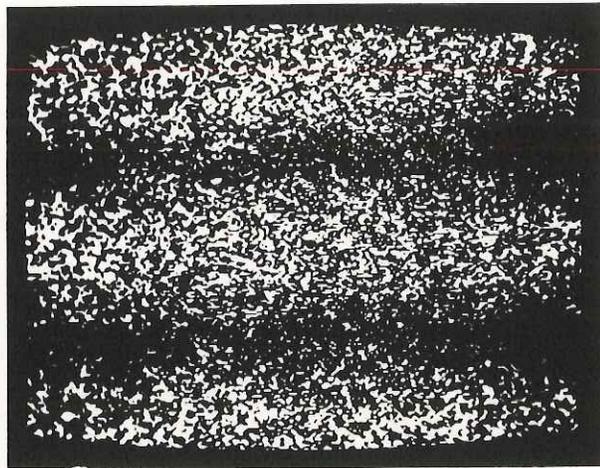
### V.3.3 Imágenes obtenidas para movimientos fuera del plano con desplazamiento giratorio vertical.

Con el interferómetro mostrado en la figura 25, también fue posible analizar movimientos giratorios verticales. Para hacer este experimento, lo que se hizo, fue girar la placa de aluminio en una forma vertical. La placa de aluminio se montó sobre un disco y este se movía por medio de un micrómetro

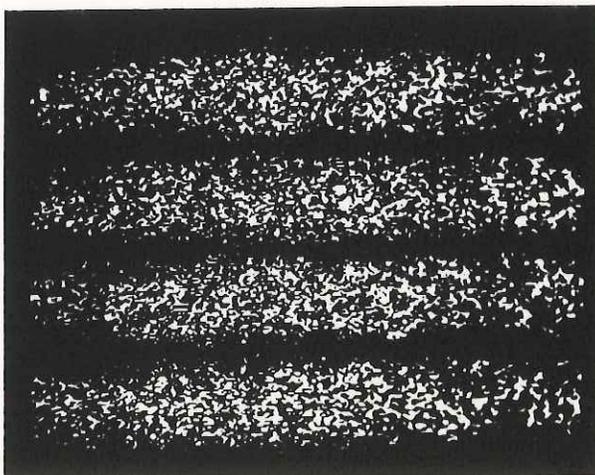
que se encontraba colocado en una de las orillas del disco. El área captada por el detector de la cámara es de 18.5 x 18.5 mm. A los patrones de franjas mostrados en la siguiente figura 31, también se les hizo el mismo realce de contraste arbitrario a partir del nivel 10 de intensidad digital. El tamaño del moteado que llega a la cámara es de 42 $\mu$ m.



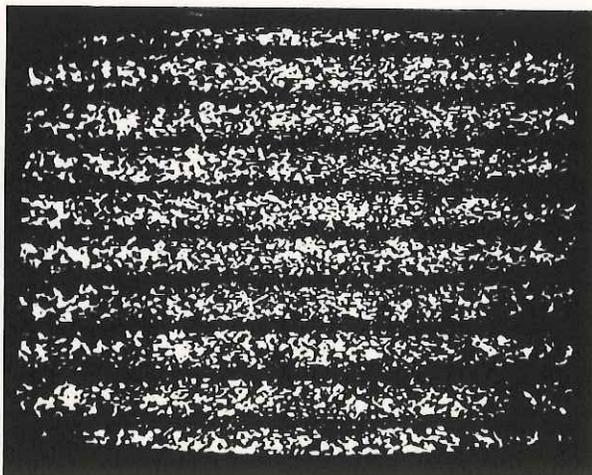
(a)



(b)



(c)



(d)

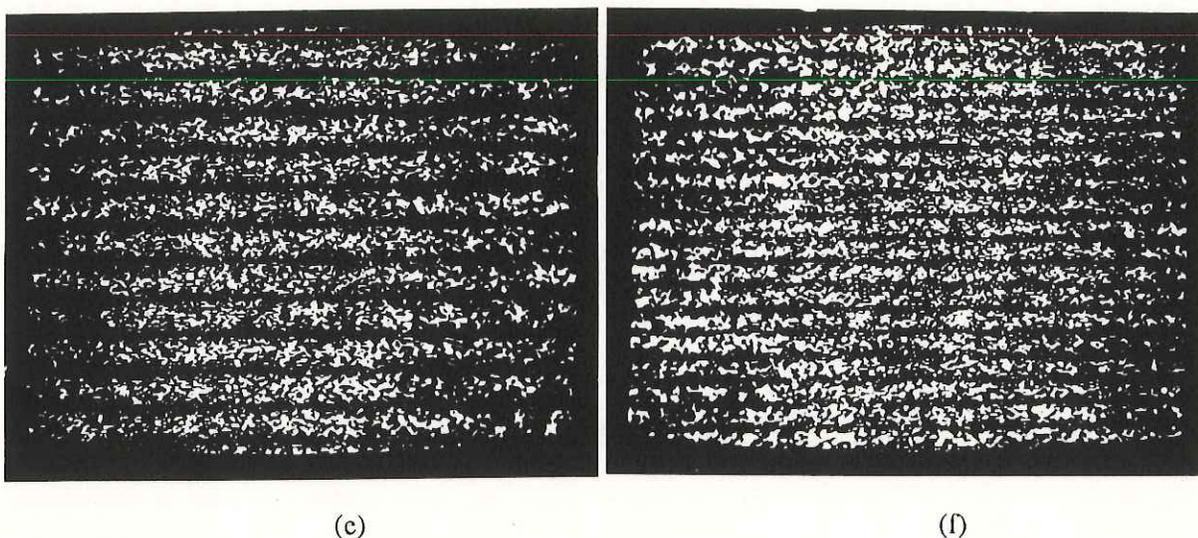


Figura 31. Patrones de franjas por correlación de intensidad para movimientos de objeto fuera de plano con desplazamiento giratorio vertical, sometidos a un realce de contraste arbitrario, haciendo blanco desde el nivel 10 de intensidad digital.

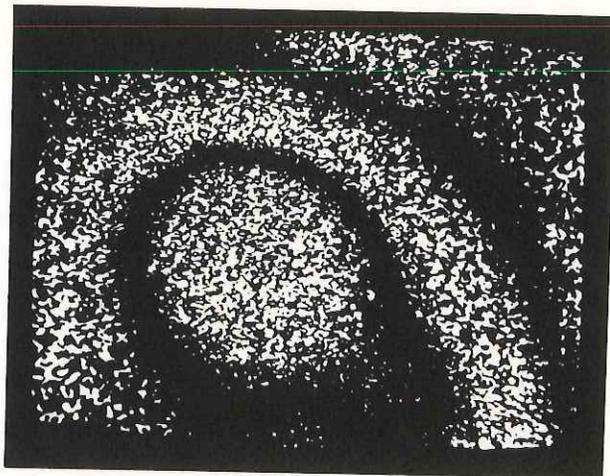
Las fotografías anteriores muestran patrones de franjas por correlación de imágenes. Como se observa, las fotografías tienen franjas horizontales las cuales indican desplazamientos giratorios horizontales fuera de plano. Entre menor es el número de franjas, menor es el desplazamiento giratorio vertical que ha sufrido el objeto.

En la fotografía (a) se observa un patrón de 1 franja negra para un movimiento de  $2.54\mu\text{m}$ . En la fotografía (b) se observa un patrón de 2 franjas negras para un movimiento de  $5.08\mu\text{m}$ . En la fotografía (c) se observa un patrón de 4 franjas blancas para un movimiento de  $6.35\mu\text{m}$ . En la fotografía (d) se observa un patrón de 9 franjas negras para un movimiento de  $10.16\mu\text{m}$ . En la fotografía (e) se observa un patrón de 12 franjas negras para un movimiento

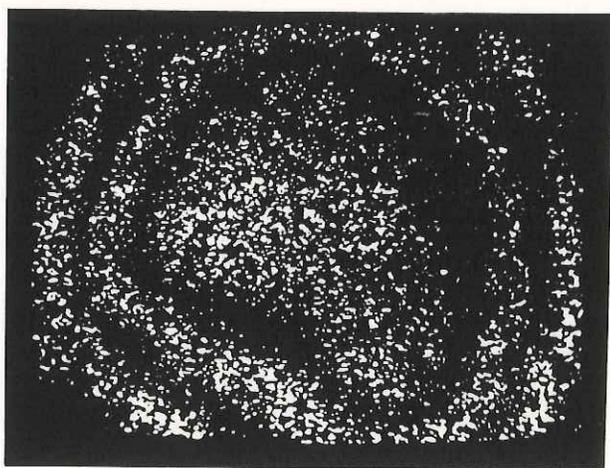
de  $12.7\mu\text{m}$ . En la fotografía (f) se observa un patrón de 18 franjas negras para un movimiento de  $20.32\mu\text{m}$ .

#### **V.3.4 Observación de desplazamientos fuera de plano para una membrana vibrante.**

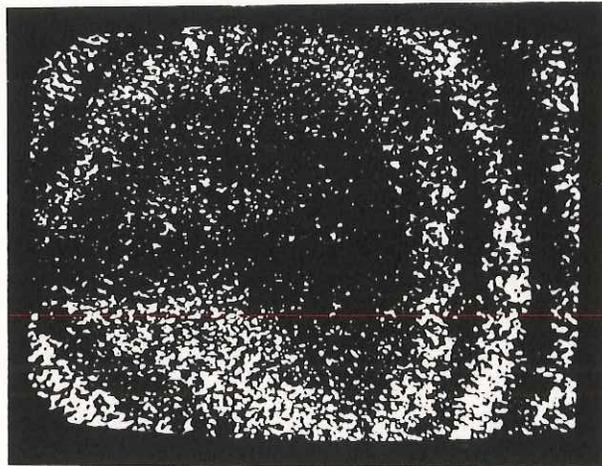
El sistema digitalizador de imágenes, obtiene una imagen a razón de 1/30 seg. por cada cuadro de imagen. Tomando en cuenta esto, se hizo el experimento de correlacionar dos imágenes de un objeto que se encontraba vibrando. El objeto que se utilizó, fue un disco de aluminio de 100mm de diámetro y 0.1mm de espesor. Fue excitado en la parte central por medio de una bocina que se colocó detrás del disco. La frecuencia de vibración del objeto, fue de 0.5Hz.. Comparado con la razón de digitalización de imágenes 1/30 seg., el período es de 2 seg. suficientemente grande para que se pudieran obtener patrones de franjas como los que se muestran en la siguiente figura 32. En este caso el tamaño del moteado es de  $57.18\mu\text{m}$ . El realce de contraste es indicado en la siguiente figura 32 para cada una de las imágenes mostradas. Los listados de los programas que se utilizaron son mostrados en los listados 3, 4, 5. y en el listado 6 se muestra el programa para hacer el realce de contraste.



(a)



(b)



(c)

Figura 32. Patrones de franjas por correlación de intensidad para movimientos de objeto fuera de plano de una membrana vibrante a 0.5Hz, sometidos a un realce de contraste arbitrario.

En la fotografía (a) no hay tiempo entre cada toma de imagen, el realce de contraste es a partir del nivel 13 de intensidad digital. En la fotografía (b) el tiempo entre cada toma de imagen es de 1 seg., el realce de contraste es a partir del nivel 21 de intensidad digital. En la fotografía (c) el tiempo entre cada toma de imagen es de 2 seg., el realce de contraste es a partir del nivel 16 de intensidad digital.

#### V.4 Listado de programas.

CLEAR BUFFER 1

CLEAR BUFFER 0

PAUSE 5

ACQUIRE 1 FRAME TO BUFFER 1

PAUSE 5

ACQUIRE 1 FRAME TO BUFFER 0

SUBTRACT BUFFER 1 FROM BUFFER 0

DISPLAY BUFFER 0

Listado 1. Este programa toma dos imágenes en 1/30 de segundo, esperando 5 seg. entre cada imagen, después hace una resta de las dos imágenes.

ATTRIBUTE RED 0 GREEN 0 BLUE 0

ALTER OUTPUT TABLE 0 ENTRY 0 THRU 9

ATTRIBUTE RED 255 GREEN 255 BLUE 255

ALTER OUTPUT TABLE 0 ENTRY 10 THRU 255

DISPLAY BUFFER 0

Listado 2. Este programa hace un realce de contraste arbitrario, toma del rango [10, 255] de intensidad digital igual a 255 que corresponde a un blanco, y el rango [0, 9] igual a 0 que corresponde a un negro.

CLEAR BUFFER 1

CLEAR BUFFER 0

PAUSE 5

ACQUIRE 1 FRAME TO BUFFER 1

ACQUIRE 1 FRAME TO BUFFER 0

SUBTRACT BUFFER 1 FROM BUFFER 0

DISPLAY BUFFER 0

Listado 3. Este programa toma cada imagen en 1/30 seg. y después se restan.

CLEAR BUFFER 1

CLEAR BUFFER 0

PAUSE 5

ACQUIRE 1 FRAME TO BUFFER 1

PAUSE 1

ACQUIRE 1 FRAME TO BUFFER 0

SUBTRACT BUFFER 1 FROM BUFFER 0

DISPLAY BUFFER 0

Listado 4. Este programa toma cada imagen en 1/30 seg. y se espera 1 seg. entre cada imagen, después se restan.

CLEAR BUFFER 1

CLEAR BUFFER 0

PAUSE 5

ACQUIRE 1 FRAME TO BUFFER 1

PAUSE 2

ACQUIRE 1 FRAME TO BUFFER 0

SUBTRACT BUFFER 1 FROM BUFFER 0

DISPLAY BUFFER 0

Listado 5. Este programa toma cada imagen en 1/30 seg. y se espera 2 seg. entre cada imagen y después se restan.

ATTRIBUTE RED 0 GREEN 0 BLUE 0

ALTER OUTPUT TABLE 0 ENTRY 0 THRU 12

ATTRIBUTE RED 255 GREEN 255 BLUE 255

ALTER OUTPUT TABLE 0 ENTRY 13 THRU 255

DISPLAY BUFFER 0

Listado 6. Este programa hace un realce de contraste arbitrario, toma del rango [13, 255] de intensidad digital igual a 255 que corresponde a un blanco, y el rango [0, 12] igual a 0 que corresponde a un negro.

## CONCLUSION

En este trabajo se ha presentado un análisis de la teoría principal sobre el funcionamiento de un interferómetro electrónico de patrones de moteado. Se plantearon expresiones matemáticas de la interferencia entre dos haces y la correlación entre dos imágenes de patrones de moteado. También fue necesario considerar parámetros limitantes de resolución en el sistema de adquisición de datos que comprende: la cámara de televisión; sistema digitalizador; capacidad de memoria para almacenar dos imágenes digitales; resolución del monitor de televisión.

La gran ventaja de este tipo de interferómetro ESPI, es que facilita el despliegue de franjas por correlación de intensidad de patrones de moteado, dando información de la cantidad y forma del movimiento del objeto para desplazamientos fuera de plano. Las franjas mostradas en el capítulo cuatro es el resultado de la correlación de intensidad de dos patrones de moteado, el tiempo máximo que hay entre la toma de estos dos patrones fue de 5 seg. y aun puede ser mayor, y el tiempo mínimo fue de 1/30 seg. El tiempo que dura todo el proceso, es decir, toma de imágenes, resta de imágenes, realce de contraste, es menor que 1 seg., lo cual da información muy aproximada de como se esta moviendo el objeto a un tiempo real. Se debe señalar que este tipo de interferómetro da información muy aproximada a tiempo real, sin embargo, esto depende de la velocidad de computo del sistema computacional que se este utilizando, es decir, hay que tomar en cuenta cuanto tiempo tarda el sistema en digitalizar, guardar en memoria, hacer resta de imágenes y desplegar la

imagen resultante en la pantalla del monitor.

Este tipo de interferómetro presenta la ventaja que es muy fácil de usar, sólo se limita simplemente a ejecutar un programa computacional que haga el proceso anteriormente descrito, sin tener que recurrir a un procesamiento fotográfico.

El sistema óptico y el objeto analizado, se montaron en una mesa que se construyó en los laboratorios y talleres de física del ITESM. La estabilidad que se logró en esta mesa fue realmente buena. Como pruebas de la mesa, se tomaron hologramas de luz láser y se comprobó que su estabilidad es suficiente para el ESPI. Se puede decir, que las vibraciones de baja frecuencia que pueda haber en la mesa donde esta montado el sistema óptico no afectan al interferómetro, si se toma en cuenta que el sistema de adquisición de imágenes toma las dos imágenes en  $2/30$  seg.

Este tipo de interferómetro mostrado en el capítulo cuatro, sólo es sensible a desplazamientos fuera del plano y en este caso en particular se alcanzó a obtener información para desplazamientos mínimos de  $2.5\mu\text{m}$ . Este tipo de interferómetro puede ser más sensible, para lograr ésto, es necesario que la cámara sea de más resolución, así como el monitor de televisión y la matriz de memoria digital que se utilice.

Uno de los problemas al contruir este interferómetro fue la alineación del sistema óptico. Como se ha mencionado las imágenes de los patrones de moteado son captadas por un monitor de T.V., el detector de la cámara debe de captar la interferencia entre el haz de referencia y el haz del objeto. Para lograr esto, la distancia entre el punto conjugado donde diverge el haz de referencia y el punto central del diafragma de la lente que forma la imagen del objeto debe ser

mínima, es decir, los parámetros  $\Delta x$  y  $\Delta l$  dados en las ecuaciones 123 y 126 respectivamente, deben ser minimizados.

Para obtener los interferogramas, mostrados en el capítulo cuatro, con un buen contraste, fue necesario el uso de la técnica de procesamiento digital de imágenes. Con esta técnica es posible obtener interferogramas de muy buena calidad y además se puede eliminar el ruido electrónico. En caso de no utilizar procesamiento digital, las franjas se alcanzan a ver muy levemente. El realce de contraste que se hizo para cada uno de los interferogramas mostrados en el capítulo cuatro, fue variable, para esto se tomó el realce de contraste a partir del nivel de intensidad más adecuado.

El interferómetro mostrado en la figura 26 puede operar sistemáticamente en el laboratorio. Se tiene planeado en un futuro, hacer que el sistema ESPI sea un aparato comercializable, para esto se tiene pensado realizar lo siguiente: hacer un sistema de adquisición de imágenes, de tal manera, que este interferómetro pueda operar en forma independiente de una computadora; en cuanto al sistema óptico, diseñar y construir un sistema de espejos compensadores del camino óptico, de tal manera, que se pueda analizar objetos a distancias mayores de 1m; también, es necesario un sistema de lentes que pueda enfocar la imagen a diferentes distancias; por último, colocar el sistema ESPI en una caja.

Los resultados obtenidos en este trabajo son satisfactorios en cuanto a la cantidad de desplazamiento que sufrió el objeto y la obtención de interferogramas de buena calidad en su imagen. Con la información proporcionada, el sistema ESPI puede ser fácilmente reproducible si se cuenta con los elementos ópticos y electrónicos mencionados en este trabajo.

## Literatura citada.

- E. Archbold, J. M. Burch, A. E. Ennos and P. A. Taylor, Nature, 222, 263-5 (1969).
- K.J. Bohlman, Closed Circuit Television for Technicals, Vol.1, Norman Price Ltd.:London (1979).
- Max Born & Emil Wolf, Principles of Optics. Pergamon Press, (1980).
- Butters, J. N., Leenderz, J. A. , J. Measmt Control, 4, 344-50 (1971).
- J. N. Butters, J. A. Leendertz, J. Phys E, 6,1106(1973).
- Robert J. Collier, Christoph B. B., Lawrence H. Lin. Optical Holography, Academic Press (1971).
- L. Ek and N. E. Molin, Opt. Commun. 2,419(1971).
- J. W. Goodman, Introduction to Fourier Optics. McGraw Hill N.Y.(1968), Caps. 5 y 6.
- Eugene Hecht & Alfred Zajac, Optica, Educativo Interamericano, (1977), Caps. 5, y 6.
- R. Jones. Opt. Laser Technol. 3,215(1976).
- R. Jones. Optical Acta, 7,949 (1981).
- R. Jones, C. Wykes, Holographic and Spleckle Interferometry, Cambridge University Press, London(1983).
- O. J. Lokberg, Phys. Technol. 11,16(1980).
- O. J. Lokberg, J. T. Malmo, Appl. Opt, 24(19), 3167(1985).
- O. J. Lokberg, J. T. Malmo. Opt. Engineering, 2, 150 (1988).
- S. Nakadate, T. Yatagai. Appled Optics. 11,1879(1980).
- G. A. Slettemoen (1977), Opt. Commun.,23,213-16 (1977).
- User Manual For DT2851, 1988 by Data Translation, Inc.
- K. A. Stetson, Optics and Laser Technology, 2, 1979-81 (1970).

