

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

FACULTAD DE CIENCIAS

**Desarrollo de un sistema Holografico
de geometría vertical**

**TESIS PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE
LICENCIADO EN FISICA**

Presentada por :

CARMEN ROSA EYZAGUIRRE GORVENIA

LIMA PERU

1996

RESUMEN

En este trabajo se presenta la construcción y optimización de un sistema holográfico de geometría vertical para aplicaciones múltiples (hologramas de transmisión, reflexión, etc.).

De un lado se presentan las tres etapas básicas experimentales seguidas en la optimización del equipo desarrollado en la UNI :

- a) La configuración óptica, cuyo objetivo fue lograr un área de iluminación homogénea en la mesa holográfica.
- b) El sistema de equilibrio mecánico de la torre holográfica.
- c) Metodología de la obtención de los patrones holográficos teniendo en cuenta las variaciones de intensidad de luz relativa tanto para el rayo de referencia como para el rayo objeto.

Y del otro lado los pasos seguidos para definir el procedimiento más apropiado de obtención de hologramas de reflexión, cuyos resultados se muestran en el catálogo holográfico HOL/UNI 95

Asimismo, el trabajo enfoca los conceptos físicos básicos de la holografía como así los aspectos técnicos, actualmente más importantes

Desarrollo de un Sistema Holográfico de geometría vertical

INDICE

I	INTRODUCCION.....	01
II	FUNDAMENTO FISICO.....	07
II A	Interferencia.....	07
II B	Difracción.....	09
II C	Holografía: Casos históricos.....	11
	C1 El holograma de Gabor.....	12
	C2 Hologramas de Leith Upatnieks.....	13
	C3 Holograma de reflexión.....	15
II D	Hologramas : Clasificación General.....	15
	D1 Con respecto a la Geometría.....	15
	D2 Con respecto a la Modulación.....	18
	D3 Con respecto al Espesor.....	21
	D4 Con respecto al Modo.....	22
II E	Holografía : Teoría Básica.....	22

E1	Hogramas Planos.....	23
E2	Hogramas de Volumen.....	25
E3	Hogramas de Reflexión.....	28
II F	Hogramas : Eficiencia de Difracción.....	30
F1	Hogramas de fase de capa delgada.....	31
F2	Hogramas de capa gruesa.....	33
III	PARTE EXPERIMENTAL.....	36
III A	Elementos ópticos utilizados para la cámara Holográfica.....	36
A 1	Banco Optico.....	37
A 2	Laser.....	37
A 3	Filtro espacial.....	37
A 4	Obturador.....	41
A 5	Espejos Deflectores.....	41
A 6	Portaplaacas.....	41
A.7	Placa Holográfica.....	42
III B	Procedimiento para el montaje del sistema.....	43
III C	Materiales y Métodos de procesamiento del Holograma.....	44
C 1	Revelado.....	44
C.2	Fijado.....	45
C 3	Lavado Final.....	45
C 4	El proceso holográfico.....	45
C 5	Procedimiento experimental de optimización.....	46
IV	RESULTADOS.....	47
IV A	Iluminación constante.....	47

IV B	Tiempo de exposición constante.....	47
IV C	Iluminación selectiva constante.....	48
V	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	49
VI	BIBLIOGRAFIA.....	52
	ANEXOS.....	53
A	ONDAS.....	53
A I	Características generales.....	53
A II	Superposición de ondas.....	56
A III	Interferencia de dos ondas circulares.....	57
A IV	Interferencia de una onda plana y una circular.....	58
A V	Película delgada absorbente.....	59
A VI	Película delgada no absorbente.....	60
B	DIFRACCIÓN.....	62
B I	Difracción por una rendija.....	62
B II	Rejilla de Difracción.....	63
C	COHERENCIA.....	65

D HOLOGRAFIA A COLOR.....	67
E EQUIPOS CONVENCIONALES USADOS.....	68
EN HOLOGRAFIA (Comerciales)	
E I Mesa Holografica.....	68
E II Disposición esquemática de los principales.....	69
elementos ópticos de un arreglo holográfico	
E III Laser de Helio Neón.....	70
E IV Expansor Telescópico.....	71
E V Filtro espacial.....	72
E VI Divisor / Atenuador de Haz.....	73
E VII Portapiacas x-y.....	74
E VIII Sistema de obturación electrónico.....	75
E IX Espejo de reflexión frontal.....	76

Desarrollo de un Sistema Holográfico de geometría vertical

I INTRODUCCION

La Holografía es un proceso fotográfico mediante el cual es posible producir imágenes tridimensionales . Las imágenes holográficas poseen todas las propiedades visuales del objeto reproducido, incluso el paralaje entre sus partes (efecto de profundidad) con respecto al desplazamiento del observador. La observación es a simple vista y no requiere de lentes , ni de otros elementos.

El proceso holografico fue inventado por D. Gabor (1948), quien le denomino holograma (del griego holos: totalidad) al registro fotográfico, indicando que se registra toda la información que genera la imagen, que de modo resumido, constituye un registro de ondas luminosas que interfieren mutuamente en la placa.

Sin embargo, desde la fecha en que Gabor elaboró el primer Holograma al presente, a pesar de las extraordinarias imágenes tridimensionales que se producen en profundidad (dentro de placas) o en alto relieve (flotando en el aire), esta técnica todavía dista mucho de haber logrado todas sus posibilidades.

Hay aun numerosas limitaciones de orden técnico que afectan : la calidad, el tamaño de la imagen, los ángulos de visión efectivos, etc. y la mayor de todas ellas es su costo. No obstante, los últimos adelantos de la tecnología la ubican ya como una herramienta de trabajo muy útil del científico, del industrial y del artista , entre otras.

Que es una imagen tridimensional ?

Si se observa a través de una ventana, se va a manifestar el efecto de paralaje, conforme al cual los objetos en la escena muestran desplazamientos relativos entre si , al mover el observador su ángulo de observación en la acción los objetos mas próximos parecen moverse en sentido contrario con respecto a los mas alejados. Estos desplazamientos paralácticos son un factor importante en la estimación de distancias.

Otra característica básica de la observación real de una escena es el efecto de enfoque, mediante el cual la vista se ajusta diferente para diferentes distancias de los objetos, dando la sensación de profundidad.

En una fotografía convencional se pierde tanto, el efecto de paralaje, como el efecto de profundidad, ya que como se observa en la figura I.1, al enfocar el objeto con una lente (o un sistema de lentes) sobre la placa fotosensible (película), queda grabada en esta la distribución de intensidades proyectada. Del otro lado un holograma sí muestra estas dos características básicas, el objeto es reconstruido espacialmente, actuando la placa holografica como si fuera la ventana de observación, cambiando el aspecto de la imagen observada de acuerdo al ángulo de observación .

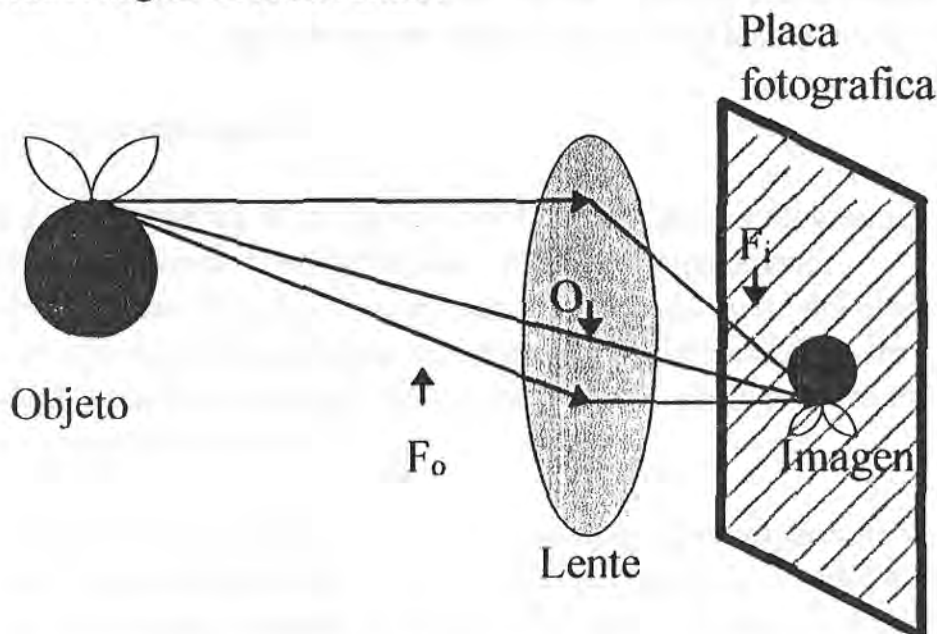


Figura I.1 : Esquema de la construcción de una imagen fotográfica convencional

Que es un holograma ?

El arte pictórico desde el Renacimiento ha procurado imitar la tercera dimensión con reglas básicas de perspectiva. El ojo ayuda en esto; pues tiende a aceptar fácilmente las concepciones artísticas.

La holografía prescinde de la necesidad de una convención artística para reproducir tres dimensiones en un medio que solo tiene dos, manifestándose con convicción total mediante una ingeniosa manipulación de la luz , proyectando una tercera dimensión donde , en el sentido del tacto, no existe ninguna. La imagen holográfica puede aparecer o bien delante o bien detrás de la placa holográfica . Un holograma de reflexión se ilumina desde el frente de la placa (usualmente con un foco de luz blanca), uno de transmisión se ilumina por detrás (usualmente un láser).

El toque final de autenticidad es el efecto de paralaje, por medio del cual , los objetos que aparecen en primer plano se mueven de manera veraz respecto al fondo al cambiar el punto desde donde se observa la imagen, manifestándose entonces partes de la escena que antes estaban ocultas tras los otros objetos.

Como se hace un Holograma ?.

En la figura I.2 se muestra el principio de elaboración de un holograma; el objeto a ser "holografiado" se ilumina con una luz suficientemente monocromática (referencia). La luz dispersada por cada punto del objeto va a incidir sobre una placa fotográfica, simultáneamente la placa debe ser iluminada con un haz de referencia de la misma fuente. En la practica esto se logra con espejos deflectores.

Los dos haces de luz (del objeto y el de referencia) se van a superponer (interferir) en la emulsión fotográfica (en donde se registra la intensidad resultante), creando así un registro permanente de la luz dispersada por el objeto bajo esas condiciones. Si la placa procesada es vuelta a iluminar por el láser en la misma forma que cuando se hizo el registro (Toma) holográfico (ver figura I.3), la distribución de intensidades almacenadas (patrón de interferencia) en el holograma hace que la luz del haz sea difractada, llegando al observador tal y como si hubieran partido del objeto , dando la sensación visual de presencia del objeto original (imagen virtual).

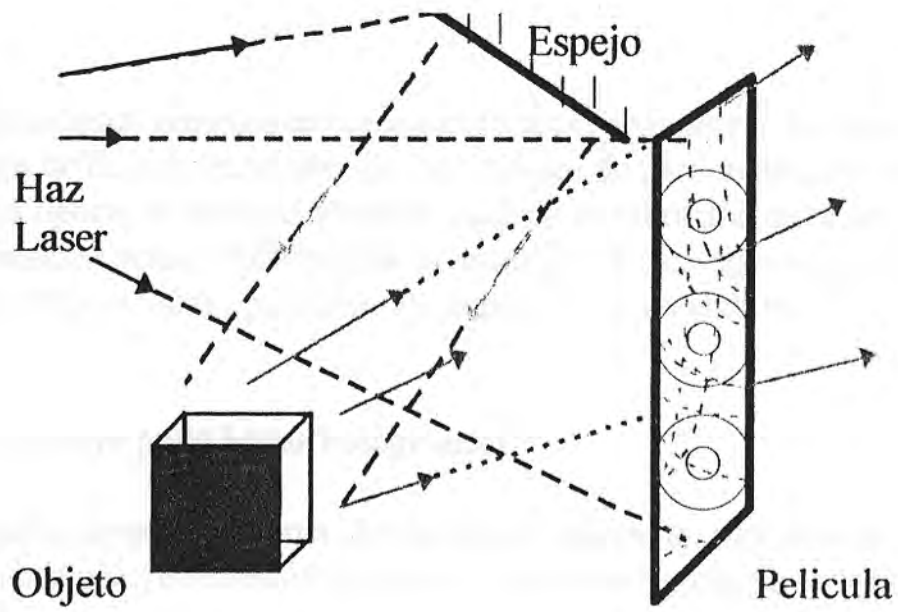


Figura I.2: Esquema del principio de elaboración de un holograma.

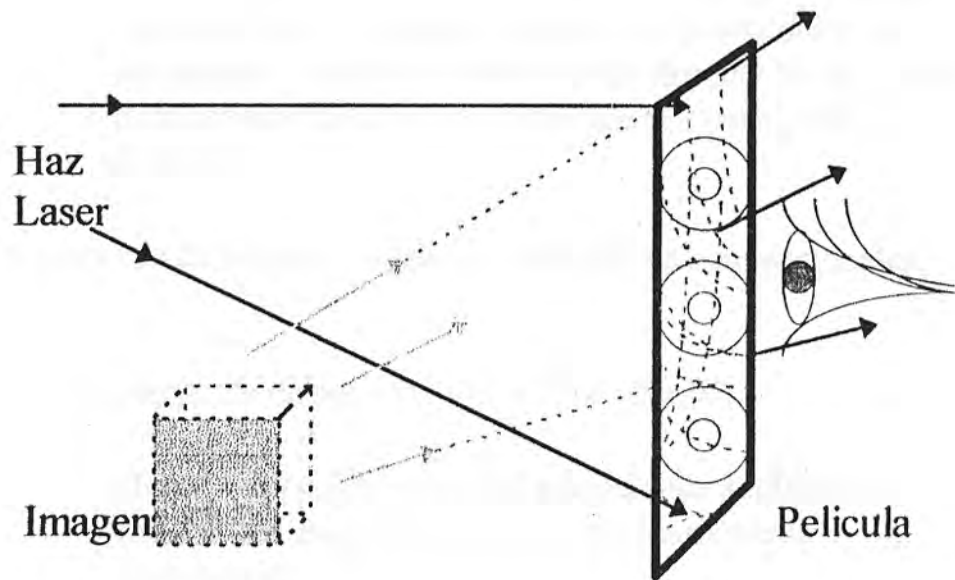


Figura I.3: Esquema del principio de observación de un holograma.

Hasta ahora las principales aplicaciones técnicas se limitan a la interferometría (mecánica de fluidos, medición de dimensiones de partículas, corrección de la distorsión óptica en sistemas visuales, análisis de vibración en tiempo real). Otra aplicación actual constituye la elaboración de catálogos holográficos de muestras de gran valor, para fines de exposición y de archivo.

Que se requiere para hacer hologramas ?

La obtención de un holograma (fotografía del objeto en tres dimensiones) ya sea de transmisión o reflexión requiere cumplir las siguientes consideraciones /ref 01/ :

- a Iluminación del objeto y la placa fotográfica (holograma) con un haz de luz coherente (igual longitud de onda, igual fase : Láser).
- b Debido a que en la placa holográfica interfieren los dos haces de luz (referencia / objeto), el sistema debe permanecer mecánicamente estable durante la exposición, para obtener un patrón de interferencia (holograma) definido.

Para cumplir estas condiciones los sistemas holográficos convencionales emplean :

- a Lasers cw de potencia (15 mW a 50 mW)
- b Mesas holográficas graníticas acopladas a muelles hidráulicos en configuraciones necesariamente horizontales.

Una alternativa opcional constituye el empleo de mesas de arena (armazón de madera) como solución inicial, presentándose no obstante los siguientes problemas :

- a Alta incidencia de polvo (negativo para la óptica)

- b Los ajustes y calibraciones no son duraderos
- c Alta incomodidad por el espacio ocupado

En vista de lo cual en el Laboratorio de óptica de la UNI se desarrollo una configuración vertical, motivo de este trabajo (tesis de licenciatura)

La tarea propuesta en este trabajo fue construir y optimizar el modelo (UNI) de Cámara Holografica de geometría vertical, aplicándolo explícitamente a la elaboración de Hogramas de reflexión.

II FUNDAMENTO FISICO

La Holografia se basa casi exclusivamente en los fenómenos físicos de *Interferencia y Difracción*

II A Interferencia

De los fenómenos básicos de interferencia, que se explican con mayor detalle en la sección apéndice A, tomamos como caso particular la interferencia de dos ondas planas, con el objeto de explicar la formación del que se puede considerar el holograma mas elemental: la rejilla de Difracción

Interferencia de dos ondas planas

Al hacer incidir simultáneamente dos ondas coherentes (planas) de la misma longitud de onda λ y la misma intensidad (por ejemplo con una lampara de sodio) sobre una pantalla desde dos direcciones ligeramente diferentes (figura II.1), la superficie de la pantalla parecerá a simple vista iluminada uniformemente. No obstante observando agudamente (o con ayuda de un microscopio) se podrá observar una serie de líneas, alternativamente brillantes y oscuras.

En algunos puntos de la pantalla las ondas están siempre en fase y se combinan dando lugar a las franjas brillantes, mientras que en otras las ondas están en oposición de fase, dando lugar a franjas oscuras.

El análisis del "patrón de interferencia" resultante (ver Figura II.2), permite concluir :

* La separación entre las franjas de interferencia (D) depende

del ángulo θ formado por las dos ondas luminosas (las normales a los frentes de onda) y de la longitud de onda λ correspondiente :

$$D = \lambda / 2 \operatorname{sen} \theta/2$$

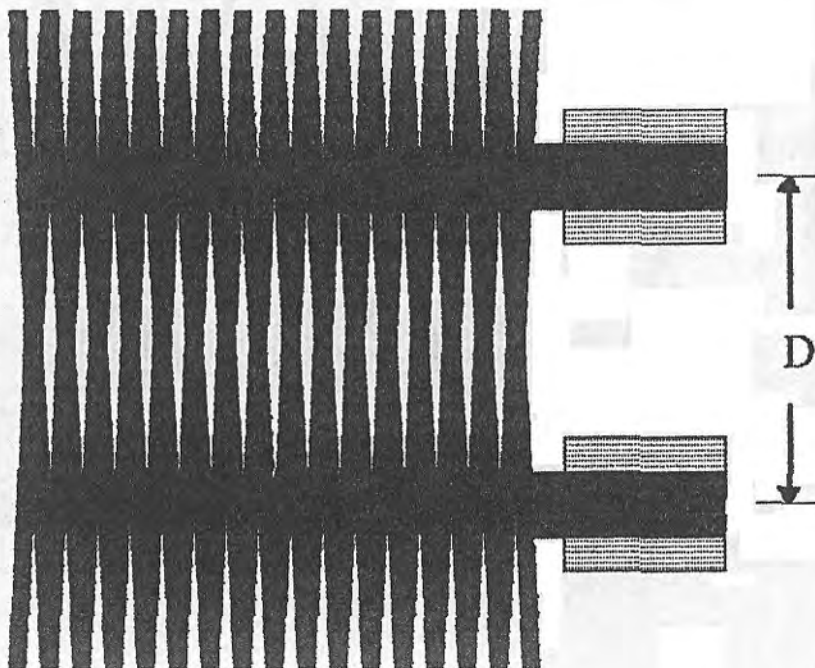


Figura II.1 : Patrón de interferencia de dos ondas planas coherentes

Esta distancia es mayor cuanto menor es el ángulo θ de interferencia entre ellos

- * El contraste de las franjas (diferencia de luminosidad entre los máximos y mínimos de la luz) es máximo en el caso de que las intensidades de las ondas luminosas sean iguales, disminuyendo a medida que la diferencia de intensidades sea mayor.

Esta descripción corresponde a la denominada "Rejilla de Difracción".

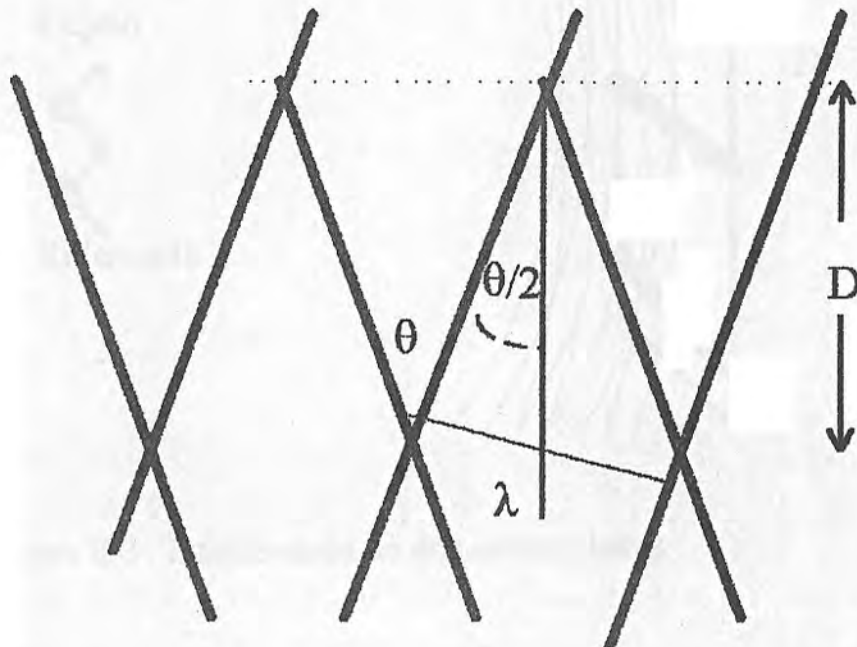


Figura II.2 : Estimación de la distancia de separación D entre las franjas de interferencia de la figura II.1

II B Difracción

Si el fenómeno de Interferencia es la base de la obtención de un holograma, el responsable de la reconstrucción de la imagen holográfica es el fenómeno de Difracción.

En general se acostumbra tratar los fenómenos ópticos : Transmisión, reflexión y difusión como respuestas independientes. Sin embargo, en la teoría ondulatoria de la luz corresponden a diferentes aspectos de un mismo fenómeno llamado Difracción.

En la sección apéndice B se presenta el fenómeno de Difracción y como caso particular la rejilla de Difracción

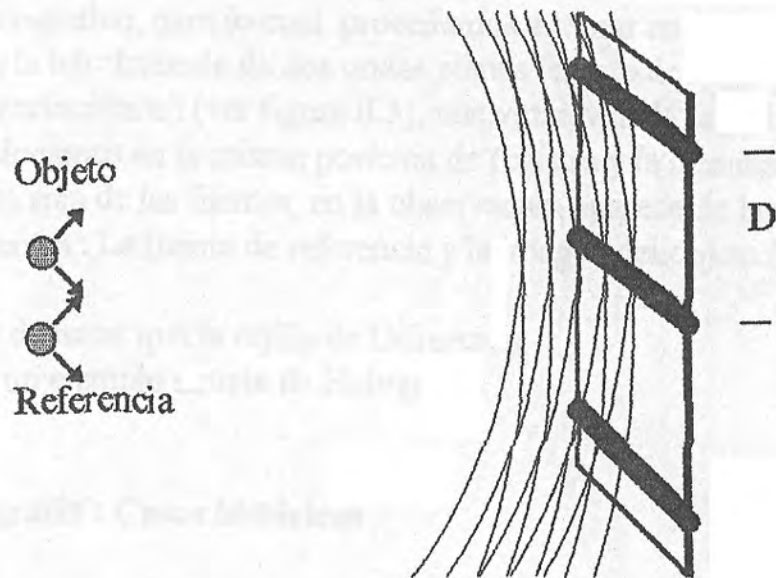


Figura II.3 Interferencia de dos ondas planas

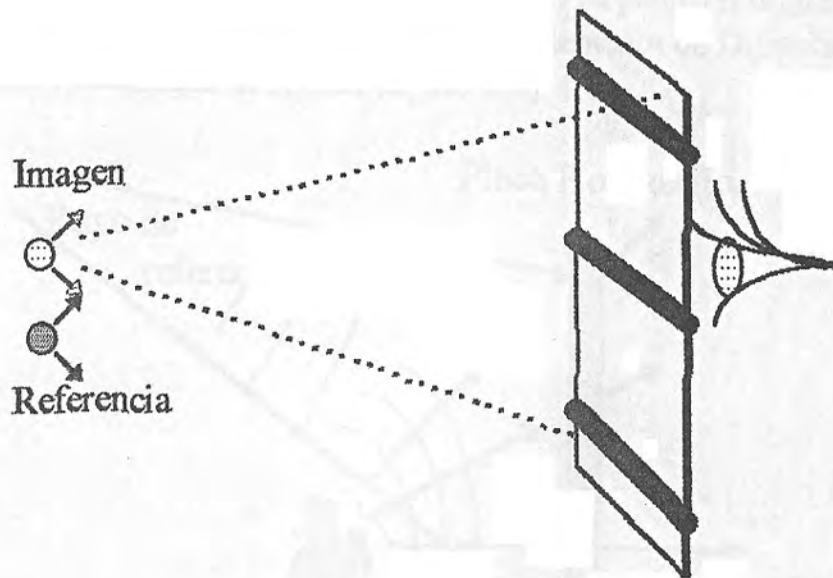


Figura II.4 Representación esquemática de una rejilla de difracción en su función "holográfica"

Una rejilla de Difracción se puede construir por el método holográfico, para lo cual procedemos a tomar una fotografía de la interferencia de dos ondas planas (efecto descrito anteriormente) (ver figura II.3), una vez revelada la película, la colocamos en la misma posición de registro y la iluminamos por una sola de las fuentes; en la observación aparecerán las dos fuentes : La fuente de referencia y la imagen del objeto.(figura II.4)

Es de notar que la rejilla de Difracción es un ejemplo simple de Holograma :

II C Holografía : Casos históricos

Cuando se ilumina un objeto con luz monocromática, cada uno de los puntos del objeto se transforma en un emisor (figura II.5). La interferencia de una fuente de referencia (onda plana) con la multitud de pequeños emisores del objeto sobre la placa holográfica produce un patrón complejo (estructura de interferencias), la que al ser revelada y colocada en su posición original sujeta a la radiación de referencia, va a actuar como un elemento de Difracción , reconstruyendo visualmente al objeto, (figura II.6)

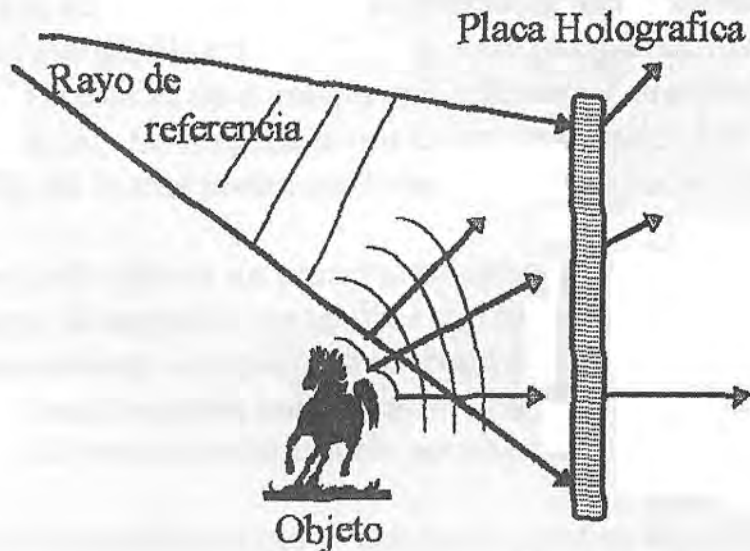


Figura II.5 . Esquema de la contribución a la formación de interferencia por cada uno de los puntos del objeto

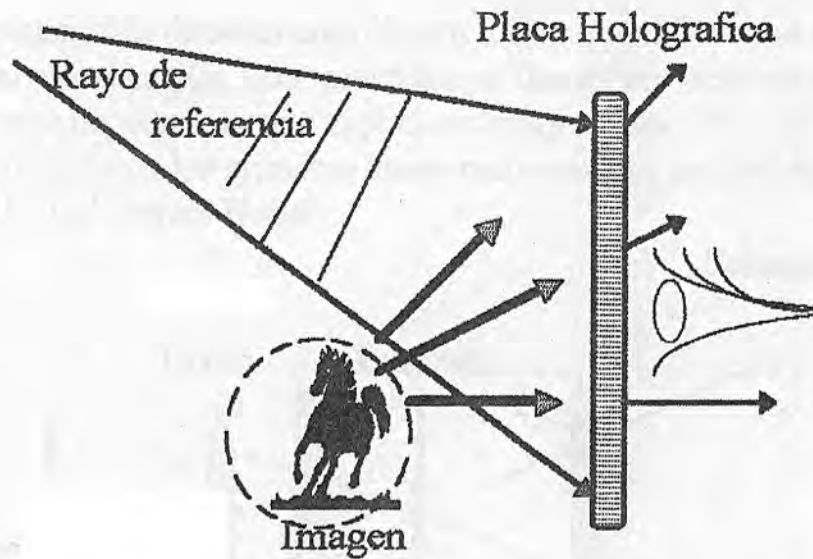


Figura II.6 . Esquema de la reconstrucción visual del objeto

C 1 : El Holograma de Gabor

El problema de la holografía reside en la dificultad de obtener una onda de referencia que sea capaz de producir patrones de interferencia con la onda luminosa proveniente del objeto que sean a la vez estables y de buen contraste, al menos durante el tiempo que dura la exposición de la placa fotográfica. Si esto no se cumple la calidad de la imagen será deficiente y de pobre luminosidad . En la época en que Gabor descubrió la holografía (1947), las fuentes luminosas disponibles tenían poca coherencia.

Gabor pudo obtener los primeros hologramas utilizando una lámpara de vapor de mercurio con un filtro que solo dejaba pasar la radiación correspondiente a un pequeño intervalo de longitudes de onda. Los objetos eran pequeñas transparencias (1 x 1 mm), de tal forma que la onda directamente transmitida actuaba como onda de referencia.

Uno de los inconvenientes es que con los medios disponibles los objetos debían ser muy sencillos y con unas características determinadas. Otro, que la luz difractada por el holograma que forma la imagen se propagaba en la misma dirección que la

transmitida directamente (figura II.7) lo que dificultaba enormemente su visualización. Los resultados no fueron por tanto muy espectaculares, lo que explica su letargo hasta 1962, fecha en que aparecieron los primeros lasers comerciales , recibiendo Gabor en 1971 el premio Nobel

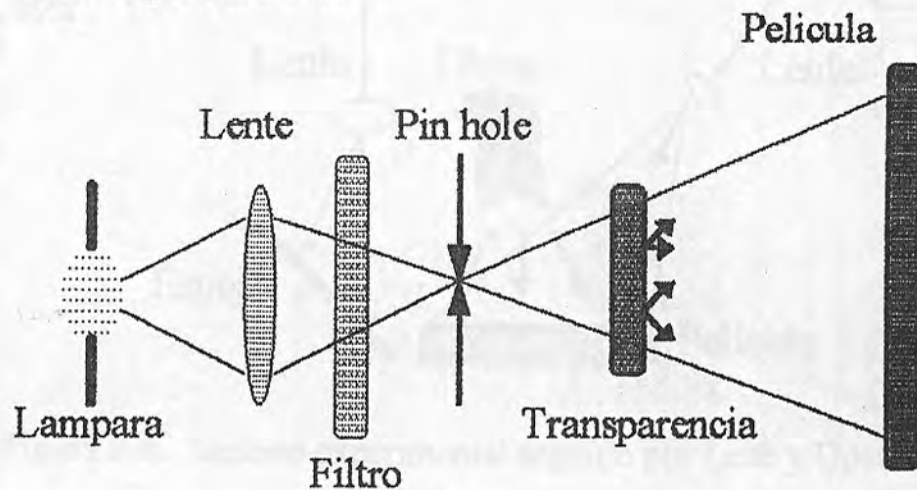


Figura II.7 . Metodo experimental empleado por Gabor

C 2 : Hologramas de Leith Upatnieks

Los científicos americanos E.N. Leith y J.Upatnieks (1962) fueron quienes , empleando un láser, propusieron el primer esquema practico para la obtención de un holograma.

El haz emitido por un láser se divide en dos partes mediante una lamina semitransparente. Uno de estos nuevos haces, después de ser expandido por una lente sirve para iluminar el objeto utilizando un espejo y la luz dispersada por este : haz del objeto, se recoge en una placa fotográfica. El otro haz, después de ser expandido es reflejado por otro espejo hacia la placa fotográfica :haz de referencia, (ver figura II.8).

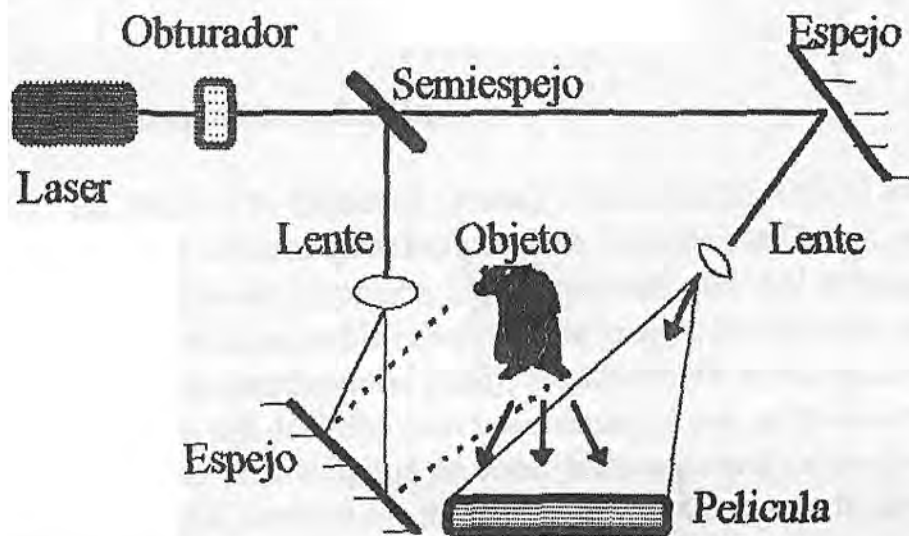


Figura II.8 . Metodo experimental seguido por Leith y Upatnieks.

Se debe tener presente que las condiciones de coherencia requeridas, a pesar de utilizar Lasers, exigen que en la obtención del holograma la fuente luminosa sea la misma. En caso contrario no es posible mantener las diferencias de fase entre las ondas del objeto y de referencia constantes mientras dura la toma holografica. Con un láser que no sea lo suficientemente monocromático es incluso necesario que el camino óptico recorrido por las dos ondas desde la lamina separadora hasta la placa sea aproximadamente el mismo, para que el contraste de las franjas de interferencia sea máximo.

La reconstrucción se hace con un láser que emita luz del mismo color y de forma que la divergencia del haz sea la misma que la del haz de referencia en la obtención del holograma.

A diferencia del método de Gabor, la luz de referencia viaja en una dirección distinta de la difractada (imagen holografica), evitándose la confusión visual. La separación angular entre ambos haces de luz es igual a la de los haces objeto y de referencia en la obtención del holograma. Los valores prácticos suelen estar comprendidos entre 20 y 50 grados, ya que en ángulos superiores las pérdidas de luz por

reflexión son considerables.

C 3 : Hologramas de reflexión

En 1963, Y.N. Denisyuk (Rusia) y Van Heerden (USA) expandieron mas aun los conceptos básicos desarrollados por Gabor , empleando el principio de Lippmann 1891, por medio del cual se emplea una emulsión fotosensible relativamente gruesa, permitiendo grabar planos de interferencias (Red), constituyendo el holograma en si una red de Difracción tridimensional con propiedades muy selectivas en la longitud de onda (*filtro espectral de banda estrecha*), efecto que permitió reconstruir los hologramas a partir de una fuente puntual de luz blanca.

II D Hologramas : Clasificación General

Los Hologramas se clasifican de acuerdo al tipo :

- * Geometría de grabación
- * Modulación impuesta
- * Espesor del material fotosensible
- * Modo de la formación de imagen

D 1 Con respecto a la Geometría

Con respecto a esta clasificación, los hologramas pueden ser a su vez de tipo :

- * Fresnel
- * Transformada de Fourier
- * Fraunhofer
- * Transformada de Fourier sin lentes

Hologramas Fresnel

De modo general, si el objeto se encuentra razonablemente cerca del medio de grabación y la fuente de referencia a una distancia grande, (figura II.9) el campo resultante en la placa holografica es el patrón de Difracción Fresnel del objeto, y el Holograma así grabado es un holograma Fresnel. Es la configuración más simple y conveniente, ya que no requiere lentes ni para la formación ni para la reconstrucción del Holograma.

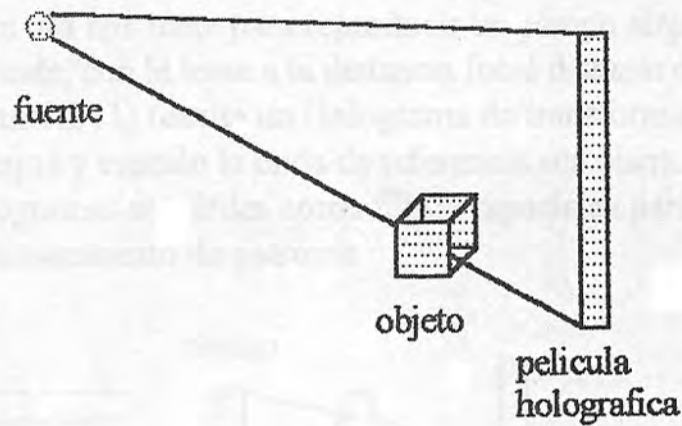


Figura. II 9 . Arreglo esquemático de un holograma tipo Fresnel

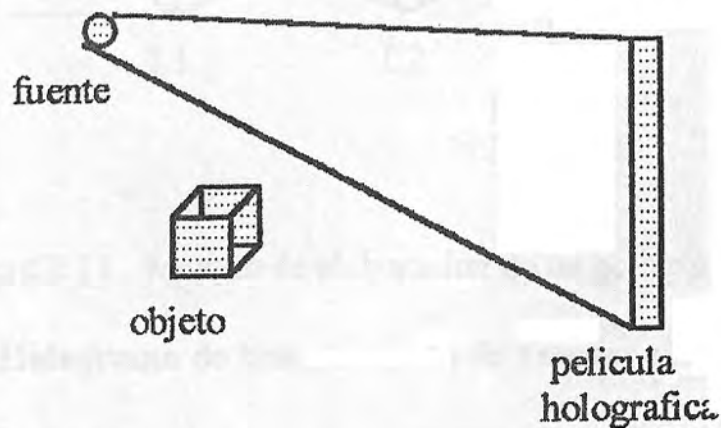


Figura II.10 . Arreglo esquemático de un holograma tipo Fraunhofer

Hologramas Fraunhofer

Si del otro lado el objeto y la película están separados varias veces la dimensión del holograma mismo, (figura II.10) el campo resultante en la película es el de Fraunhofer, resultando un holograma de Fraunhofer. El holograma de Gabor fue de este tipo.

Holograma de transformada de Fourier

Si se usa una lente para reproducir un campo alejado sobre la película, con la lente a la distancia focal distante de la placa, (figura II.11) resulta un Holograma de transformada de Fourier, siempre y cuando la onda de referencia sea plana. Tales hologramas son útiles como filtros espaciales para el reconocimiento de patrones

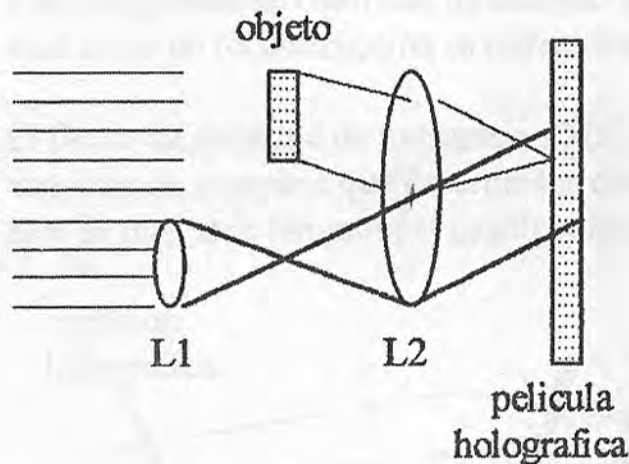


Figura.II.11 . Metodo de elaboracion de un holograma de Fourier

Holograma de transformada de Fourier sin lente

Finalmente si el rayo de referencia incide lateralmente de una distancia relativamente grande (ondas planas). Ver figura II.12 entonces resulta un holograma de transformada de Fourier sin lente

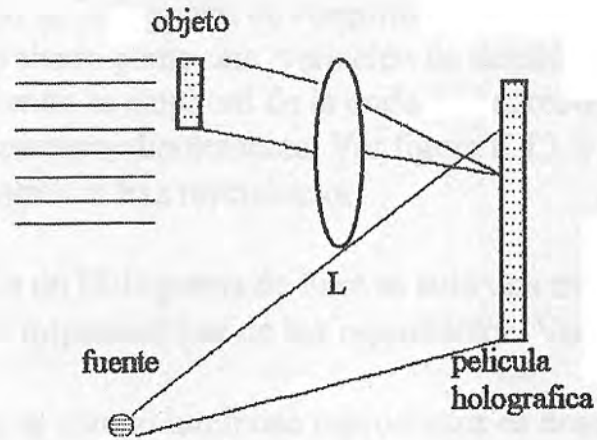


Figura II.12 . Diagrama de formación de un holograma de Fourier sin lente

D 2 Con respecto a la Modulación

Los hologramas se clasifican de acuerdo al mecanismo por el cual la luz de reconstrucción es difractada.

El factor de amplitud de transmisión $T(x)$ de un Holograma es una función compleja que describe los cambios en amplitud y fase de una onda luminosa al incidir sobre la película

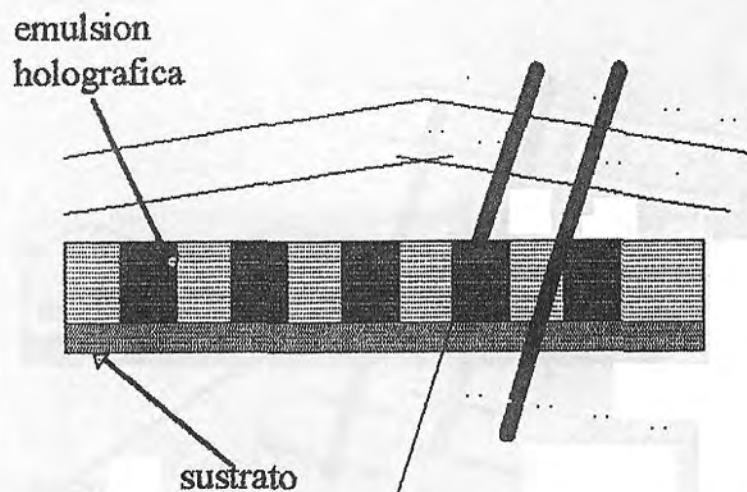


Figura II.13 Representación esquemática de un holograma de Volumen

En un holograma de Amplitud el patrón de interferencias es grabado como una variación de densidad del medio grabado, siendo la amplitud de la onda de luz reproductora modulada correspondientemente. Ver figura II.13. y su efecto modulador sobre un haz reproductor.

En un Holograma de Fase es solo una modulación de fase la que se impone al haz de luz reproductor. Ver figura II.14.

Si el campo luminoso reproductor es descrito por una función compleja $C(x)$, donde x es la dimensión en el plano holográfico tal que:

$$C(x) = C_0(x) \exp [i\phi_0(x)]$$

y el campo transmitido $\psi(x)$:

$$\psi(x) = b_t(x) \exp [i\phi_t(x)]$$

Luego la amplitud de la transmitancia del Holograma se define como la relación de estas dos cantidades:

$$T(x) = \psi(x) / C(x) = [b_t/C_0] \exp i(\phi_t - \phi_0)$$

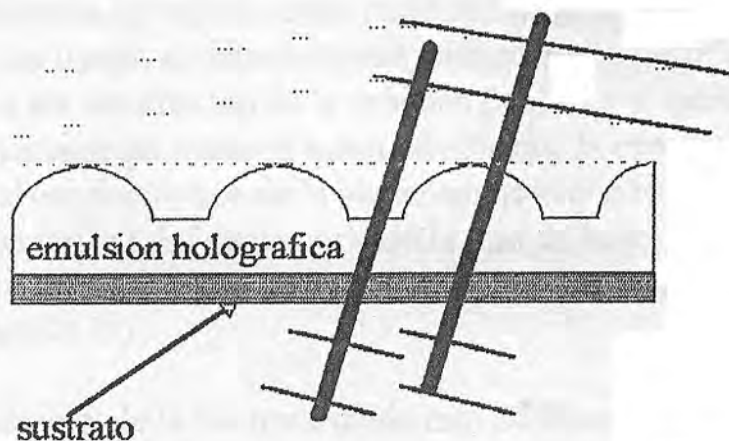


Figura II.14 : Representación esquemática de un Holograma de fase y su función moduladora sobre un haz reproductor

En la mayoría de casos, la onda luminosa reproductora C_0 es constante o quasiconstante, tal que la amplitud compleja de transmitancia es dada por:

$$T(x) = b_t(x) \exp i [\varphi_t(x) - \varphi_0(x)]$$

Si $b_t(x)$ no es constante pero si $\varphi_t(x)$, entonces es la amplitud de la onda luminosa la que es modulada y el Holograma es un **Holograma de Amplitud**. La magnitud de $b_t(x)$ va a depender de la constante de absorción α y del espesor del material de la emulsión fotosensible, de acuerdo a:

$$b_t(x) = C_0(x) \exp [-\alpha(x) d]$$

Así para un holograma de Amplitud, la amplitud de la transmitancia esta modulada de acuerdo con la exposición, ya que esta determina una variación espacial de la constante de absorción α . Los materiales fotosensibles mas comunes que pueden cumplir esta función son las emulsiones fotográficas en base a haluros de plata y materiales fotocromicos.

Si del otro lado, $b_t(x)$ es constante y $\varphi_t(x)$ varia, entonces la fase de la onda luminosa reproductora es objeto de la modulación y el holograma es un Holograma de fase. La fase de la onda luminosa puede ser modulada de dos modos diferentes. Si se encuentra un relieve como resultado de la exposición al patrón de las franjas de interferencias, entonces el espesor del material va a ser una función de la posición (x). Si es el índice de refracción del material quien cambia con la exposición, entonces es el camino óptico de la luz transmitida que es una función de la posición (x). En cualquier caso la fase de la luz transmitida variara con (x), ya que el camino óptico nd será una función de la posición (x).

La fase φ_t de la luz transmitida esta relacionada con el camino óptico de acuerdo a :

$$\varphi_t = 2\pi nd/\lambda$$

Un holograma de fase resulta así cuando φ_t es una función de la exposición. En el caso de sufrir variación tanto del relieve Δd como así del índice de refracción Δn , entonces el cambio en la fase $\Delta\varphi$ será :

$$\Delta\varphi = (2\pi/\lambda) [d\Delta n + (n-1)\Delta d]$$

Donde el factor $(n-1)$ aparece porque se asume que el holograma es observado en el aire. Si el holograma es delgado, d es muy pequeño, siendo su contribución al cambio de fase $\Delta\varphi$ despreciable, luego en este caso :

$$\Delta\varphi_t = (2 \pi / \lambda) (n - 1)\Delta d$$

Lo que constituye un Holograma de relieve superficial, logrado principalmente por estampado, grabado de una resina fotosensible o de una película termoplástica.

Para un Holograma grueso, de otro lado teniendo un relieve superficial despreciable pero si una variación del índice de refracción se tendrá :

$$\Delta\varphi_t = (2 \pi / \lambda) d \Delta n$$

Materiales típicos para este tipo de hologramas son las emulsiones fotográficas blanqueadas, gelatina dicromatada, cristales ferroelectricos.

D 3 Con respecto al Espesor

Cualquiera de los tipos de Hologramas descritos puede ser registrado ya sea como un Holograma "delgado" o "grueso". Un Holograma delgado (o plano) es uno para el cual el espesor de la emulsión fotosensible es pequeño comparado al espaciamento entre las franjas de interferencia. Un Holograma grueso (de volumen) es uno para el cual el espesor es del orden de

magnitud o mayor que el espaciamento entre las franjas. La distinción entre Hologramas delgados y gruesos se efectúa ordinariamente con ayuda del Factor Q definido como :

$$Q \equiv 2\pi\lambda d / (n\Lambda^2)$$

Donde λ es la longitud de onda incidente, n el índice de refracción de la emulsión fotosensible, d el espesor de la película y Λ el espaciamento medio de las franjas de interferencia. El Holograma es considerado grueso cuando $Q \geq 10$ y delgado en caso contrario.

D 4 Con respecto al Modo

Si los dos rayos que interfieren mutuamente en la placa vienen del mismo lado de ella, el grabado del patrón de interferencia se dice que es de transmisión; en este caso la visualización es del otro lado de la incidencia del rayo. El holograma de Gabor fue de este tipo con la agravante de haber sido también un holograma en línea. Los hologramas de Leith-Upatnieks también son de transmisión, donde los rayos que interfieren llegan al medio de grabación de direcciones diferentes (fuera de eje).

Si los dos haces que interfieren inciden en la placa viajando de lados opuestos a la placa, el holograma registrado se dice que es de reflexión (de Lippmann), pues su visualización del lado de la incidencia del rayo.

II E Holografía : Teoría básica

La Holografía de sistema no axial es la mejor forma actual de realizar hologramas y es desde el punto de vista conceptual, el más simple de trazar teóricamente. En esta sección, describimos la teoría de este método para hologramas de geometría plana y los conceptos básicos referentes al caso de emulsiones de capa gruesa.

E 1 Hologramas planos

Por un holograma plano (o delgado) se quiere dar a entender que se trata de un holograma cuyo capa emulsiva fotosensible es delgada comparada con el espaciamento de la frecuencia espacial mas alta (separación mínima) del patrón de exposición, el cual es básicamente bidimensional.

Considere el diagrama esquemático mostrado en la figura II.15 , donde **O** es el frente de onda proveniente del objeto y **R** es el campo de referencia. ambos interfieren en la placa holográfica **H**.

El campo resultante en **H** es : **O + R**.

La irradiancia $I(x)$ sobre la placa fotográfica esta dada por:

$$I(x) = (O + R)(O + R)^* = OO^* + RR^* + OR^* + O^*R$$

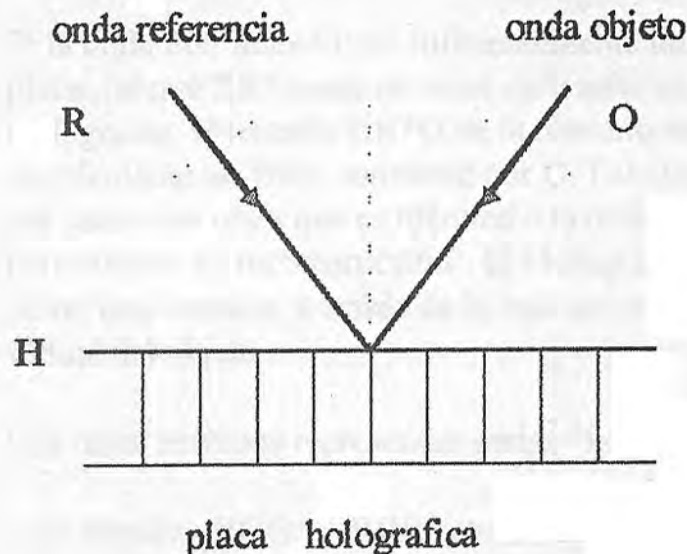


Figura II.15 . Diagrama esquemático de la interferencia de dos ondas planas (referenci y objeto) sobre la placa holográfica

Asumiendo que estas intensidades de radiación corresponden a la región lineal de sensibilidad de la película, la amplitud de transmisión $T(x)$ en función de la resultante de exposición $E(x)$

será :

$$T(x) = T_0 + B E(x)$$

Donde T_0 es una constante (transmitancia de fondo) y B es un parámetro determinado por la sensibilidad de la emulsión y las condiciones del procesamiento. Puesto que $E(x)$ es directamente proporcional a $I(x)$, podemos escribir :

$$T(x) = T_0 + B t (OO^* + RR^* + OR^* + O^*R)$$

donde t : es el tiempo de exposición, el cual dependerá de la sensibilidad de la película.

Cuando un holograma con esta transmitancia es iluminada nuevamente con una onda de referencia R , la onda transmitida por el holograma es: $X(x)$

$$X(x) = R(x) T(x)$$

$$= R T_0 + B t (ROO^* + RRR^* + RR^*O + RRO^*)$$

Si la onda iluminante R es suficientemente uniforme sobre la placa, tal que RR^* toma un valor constante en todo el Holograma, el término RR^*O de la relación anterior resulta simplemente un valor constante por O . Este término representa por tanto una onda que es idéntica a la onda del objeto original O , permitiendo su reconstrucción. El Holograma se comporta así como una ventana, a través de la cual se observa una imagen virtual del objeto.

Los otros términos representan ondas "fantasmas":

- El término $ROO^* + RRR^*$ es la onda de orden Cero.
- El término RRO^* es la onda de primer orden y es conocida como la onda conjugada.

A su vez, la imagen conjugada puede actuar como una imagen

real o como una imagen virtual, dependiendo de la geometría particular usada para formar el holograma. Cuando la imagen es real, esta se encuentra espacialmente localizada en frente del holograma (del lado de la vista).

Estos dos últimos términos representan ondas visuales que perturban eventualmente la visualización del objeto, como era el caso en la experiencia de Gabor . En los arreglos actuales con el haz de referencia excéntrico, estas ondas están separadas espacialmente de la onda O objeto reconstruida. Esta es la mayor ventaja de la técnica "fuera de eje" y es la razón principal de su gran utilización.

E 2 Hologramas de volumen

Si la emulsión fotográfica es algo mas gruesa que el periodo mínimo de las franjas de interferencia, el holograma se denomina un holograma de Volumen. Esto significa que los patrones de interferencia se extienden no solo en su superficie sino en todo su interior. Un Holograma de volumen tiene un cierto numero de propiedades que no muestran los hologramas planos.

Considerando el caso de un holograma de transmisión volumétrico, con dos rayos incidiendo simétricamente sobre la emulsión gruesa: El rayo R de referencia y el rayo O del objeto. El resultado de este análisis puede ser generalizado para cualquier objeto, ya que una onda objeto se puede descomponer siempre en ondas planas. Las ondas R y O inciden en la placa haciendo un ángulo ϕ entre ellas y por comodidad se considera que ambos bisectan a la normal a la superficie holográfica. La interferencia de R y O van a producir un conjunto de franjas paralelas y perpendiculares a la emulsión y de espaciamiento d :

$$d = \lambda / [2 \text{ sen}(\phi/2)]$$

* En un caso general los rayos R y O no van a bisectar necesariamente a la normal del plano holografico , no obstante, el resultado es que se forman también un conjunto de franjas

paralelas, orientados oblicuamente con respecto a esa normal. Por tanto, suponiendo que en la placa holográfica queda grabado ese patrón tridimensional y nosotros reiluminamos bajo un ángulo θ , el cual no es en general igual al $\phi/2$ de grabación.

Bajo esas condiciones, para obtener una reconstrucción de la imagen (onda objeto), es necesario que todos los rayos que se reflejen en los planos semireflejantes se sumen en fase, debiéndose cumplir la siguiente relación:

$$\text{sen } \theta = \pm \lambda / 2 d$$

que es la condición de Bragg.

Comparando las dos últimas relaciones, obtenemos las siguientes cuatro soluciones:

$$\theta = \pm \phi / 2 \quad \text{y}$$

$$\theta = \pm (\pi - \phi / 2)$$

En vista de lo cual se pueden presentar los siguientes casos:

- a) Cuando el rayo reiluminante es idéntico al rayo de referencia ($\theta = \phi / 2$) la onda objeto es reconstruida y se forma la imagen virtual del objeto. En este caso no se observa ninguna imagen conjugada (figura II.16)

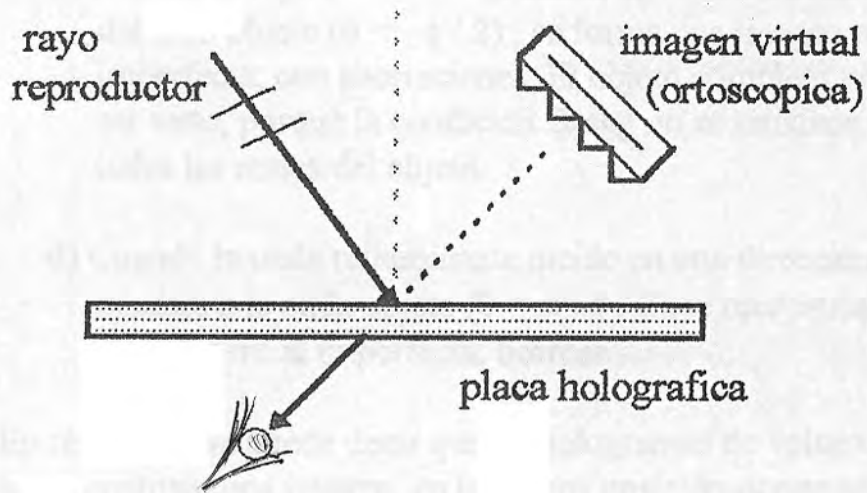


Figura II.16 . Esquema de la visualización normal (ortoscópica) de la imagen holográfica por transmisión

- b) Cuando el rayo reiluminante incide en dirección opuesta al de referencia inicial ($\theta = -(\pi - \phi / 2)$), se reconstruye una imagen real del objeto, pero de modo pseudoscópico (curvatura inversa) y no se observa ninguna imagen virtual. (figura II.17).

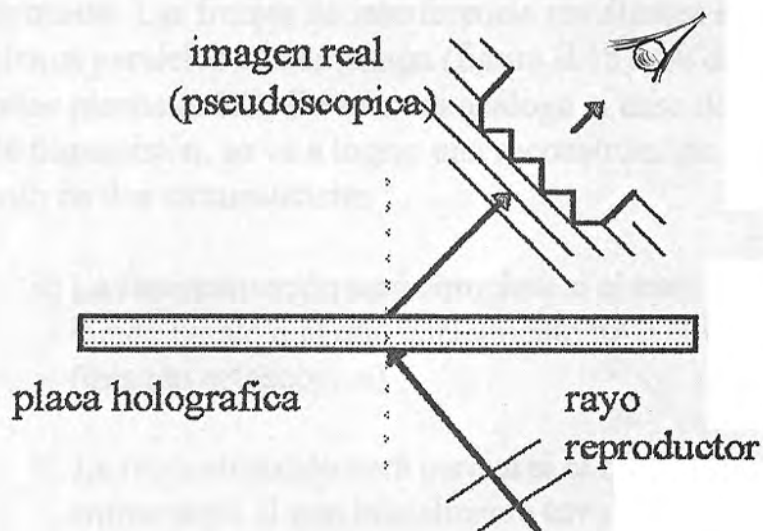


Figura II.17 . Esquema de la visualización inversa (pseudoscópica) de la imagen holográfica por transmisión.

- c) Cuando el rayo reiluminante incide en la misma dirección del rayo objeto ($\theta = -\phi / 2$), se forma una imagen real imperfecta, con aberraciones. El objeto completo no puede ser visto, porque la condición Bragg no se satisface para todas las ondas del objeto.
- d) Cuando la onda reiluminante incide en una dirección opuesta a la onda objeto ($\theta = \pi - \phi / 2$) se reconstruye una imagen virtual imperfecta, borrosa.

En resumen, se puede decir que en hologramas de volumen solo se reconstruye una imagen, en la misma posición donde se encontraba el objeto cuando se formó el holograma. Si el rayo reconstruyente es paralelo al de referencia, la imagen es ortoscópica. No obstante si el rayo reconstituyente es antiparalelo con el rayo de referencia, la imagen es pseudoescópica.

E 3 Hologramas de Reflexión

En un holograma de reflexión la onda de referencia **R** y la onda objeto **O** inciden sobre la placa Holográfica de direcciones opuestas. Las franjas de interferencia resultantes son entonces planos paralelos a la emulsión (figura II.18). La distancia entre estos planos es $\lambda/2$. De manera análoga al caso de los hologramas de transmisión, se va a lograr una reconstrucción visual del objeto solo en dos circunstancias:

- a) La reconstrucción será completa si el rayo reconstuctor incide paralelo al que inicialmente tuvo el rayo de referencia (imagen ortoscópica)
- b) La reconstrucción será parcial si el rayo reconstuctor incide antiparalelo al que inicialmente tuvo el rayo de referencia (imagen pseudoescópica)

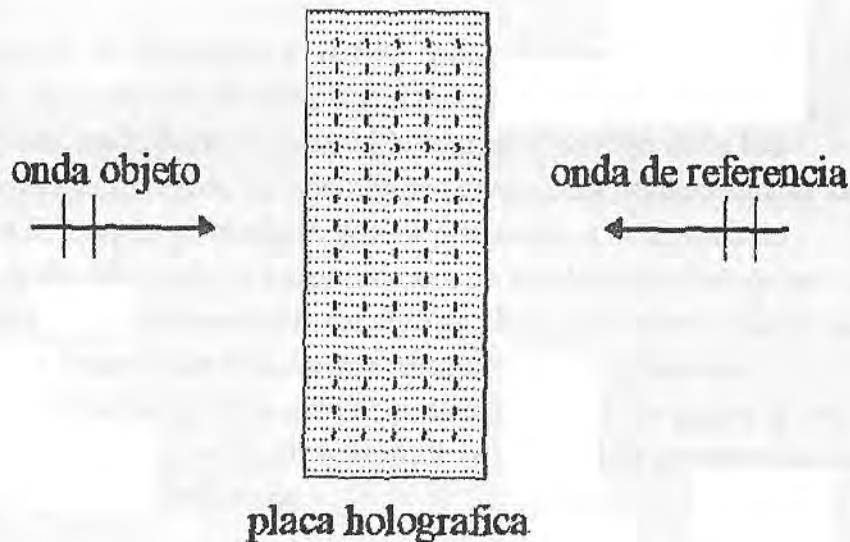


Figura II.18 . Esquema de la representación de los planos de interferencia básicos en un holograma de reflexión.

La mayor ventaja de los hologramas de reflexión es que se puede reconstruir una onda imagen monocromática a partir de una iluminación con luz blanca. Los planos Bragg resultantes en la emulsión van a actuar como un filtro de interferencia, produciendo una alta reflectividad solo para aquella longitud de onda que la produce. No obstante, en la práctica un holograma grabado a cierta longitud de onda se reconstruye en una longitud de onda algo más corta. Así por ejemplo: un grabado en color rojo se reconstruye usualmente de color verde. Esto se debe básicamente a una reducción de la emulsión durante el proceso fotográfico. El espaciamiento de los planos Bragg es menor que el grabado inicialmente. Es de notar también que una iluminación del holograma con luz blanca, resulta también en una pérdida de resolución en la imagen ya que el holograma actúa como un filtro espectral con un ancho de banda de cerca de 10 nm, el cual es todavía muy ancho para producir imágenes de gran resolución.

II F Eficiencia de difracción

La eficiencia de difracción se define como la relación del flujo de luz total útil, formante de imagen, difractado por el holograma al flujo total de luz usado para iluminar el holograma. Si algo de la luz iluminante es difractada en una imagen conjugada no deseada, es solo la luz de la imagen primaria la que es pertinente a la formulada eficiencia de difracción. La importancia de producir un holograma de una eficiencia de difracción razonable es obvia, ya sea se trate de una buena visualización de una escena tridimensional, aplicar en *interferometria holografica* o en el *almacenamiento de datos*; el uso eficiente de la luz reproductora permite la utilización de sistemas mas pequeños y mas económicos.

No obstante, se debe tomar la definición anterior de eficiencia con cierto cuidado, ya que la calidad de un holograma también depende de otros aspectos. En muchos casos es la magnitud de la señal de salida en relación al ruido el factor mas importante. El ruido de una imagen *holografica* proviene básicamente por tres causas:

- * No linealidad intrínseca

Tal como ocurre en hologramas de fase, lo que ocasiona que señal visual no deseada sea difractada en la dirección de la señal imagen.

- * No linealidad del Revelado

Característica propia de la emulsión fotográfica, que depende tanto de el juego de intensidades , como así del tiempo de exposición de la toma.

- * Resolución de la Película

La estructura granular de la película contribuye a aumentar el ruido .

Las ecuaciones que describen la eficiencia de difracción de los diversos tipos

de hologramas posibles se dividen en dos grupos, según se trate de hologramas planos o hologramas volumétricos. Esta agrupación se debe a que la descripción de los procesos de difracción que corresponden a ambos casos son fundamentalmente distintos, no obstante haberse demostrado que en el caso más común de hologramas de amplitud, para la gran mayoría de casos prácticos, las eficiencias de difracción resultantes son equivalentes, no siendo el caso de los hologramas de fase.

F 1 Hologramas de Fase de capa delgada

Si la fase de una onda transmitida es proporcional a la exposición, luego :

$$\varphi_t(x) = \gamma E(x)$$

Un holograma de fase resulta si

$$E(x) \propto [O + R]^2$$

Donde : $O(x) = O_0 \exp i \varphi_0(x)$: Campo del objeto

$$R(x) = R_0 \exp i \beta x$$

Por tanto:

$$T_a(x) = b t \exp i \varphi_t(x)$$

$$= b t \exp i \gamma (O_0^2 + R_0^2) \exp 2i \gamma O_0 R_0 [\cos(\varphi_0 - \beta x)]$$

$$= K \exp i a \cos \Theta$$

Usando la relación :

$$\exp i x = \cos x + i \sin x$$

Y las expansiones Bessel :

$$\cos(a \cos \Theta) = J_0(a) + 2 \sum_n (-1)^n J_{2n}(a) \cos 2n\Theta$$

$$\text{sen}(a \cos \Theta) = 2 \sum_n (-1)^{n+2} J_{2n+1}(a) \cos[(2n+1) \Theta]$$

Se puede escribir :

$$T_a = K \{ J_0(a) + 2 \sum_n (-1)^n J_{2n}(a) \cos 2n \Theta \\ + 2 i \sum_n (-1)^{n+2} J_{2n+1}(a) \cos[(2n+1) \Theta] \}$$

Las $J_n(a)$ son las funciones Bessel de primera clase . Cada una corresponde a la amplitud del orden de difracción n . El termino que deriva a la imagen holográfica es el termino de primer orden : $K[2 i J_1(a) \cos \Theta]$, que puede ser escrito como:

$$2 i K J_1(a) (\exp i \Theta + \exp -i \Theta)/2 =$$

$$i K J_1(a) [\exp i(\varphi_0 - \beta x) + \exp -i(\varphi_0 - \beta x)]$$

Los dos términos resultantes representan las ondas imagen primaria y conjugada. El termino de transmisión que conduce a la imagen primaria es:

$$T_a(x) = bt \exp [y(\gamma O_o O_o + \gamma R_o R_o + \pi/2)]$$

$$\{ J_1(2\gamma O_o R_o) \exp[i(\varphi_0 - \beta x)] \}$$

Por tanto cuando el holograma es iluminado con una onda de amplitud unitaria, la onda difractada de primer orden va a tener una amplitud T_a dada por la ultima relación. Puesto que estamos asumiendo por simplicidad de que estamos observando un holograma de fase puro, es decir , no ocurre absorción , $bt = 1.0$, entonces la amplitud de la onda difractada es simplemente $J_1(2\gamma O_o R_o)$. La eficiencia de difraccion va ser igual al cuadrado de esta cantidad . El valor máximo será por tanto 0.339, el cual es considerablemente mas alto que la eficiencia máxima obtenible por los hologramas de amplitud (0.0625). De otro lado, la eficiencia de hologramas de fase gruesas es aun mayor, lo que explica el mayor interés que despiertan.

F 2 Eficiencia de Hologramas de capa gruesa

En los hologramas de capa gruesa, como es el caso de un holograma de reflexión, se debe tener en cuenta que debido a la alta eficiencia de difracción, la onda iluminante va ser fuertemente desviada de su trayectoria, en su recorrido por la red. De hecho debido al efecto de selectividad de la red (efecto Bragg), uno debe tener en cuenta que en algún punto de ella van a existir dos ondas interactuantes de igual magnitud viajando conjuntamente. Este planteamiento es la base de la teoría de ondas acopladas, aplicadas exitosamente por Kogelnik /7/ al problema de difracción de hologramas de capa gruesa. El análisis en si es muy elegante y da respuesta a las sensibilidades angulares y de longitud de onda para todos los tipos de hologramas posibles (transmisión y reflexión, de amplitud o fase, con o sin pérdidas, con planos interferométricos paralelos u oblicuos). La ecuación también da por supuesto, la eficiencia de difracción máxima.

Para un tratamiento completo de la teoría se recomienda la referencia /7/, en lo que respecta a este trabajo solo nos limitamos a presentar algunos lineamientos generales y los resultados referentes a la eficiencia de los hologramas de reflexión.

Se considera ondas propagándose en un plano (yz), con la placa holográfica coincidiendo con el plano xy y $z = 0$, de espesor T, y el eje z perpendicular a ella.

Si se supone que una onda iluminante **R** incide sobre un holograma de reflexión, esta va a ser difractada selectivamente en la red compleja de la emulsión, dando lugar a onda total de difracción, cuya amplitud es **S**, si se asume amplitud unitaria para la onda incidente las condiciones de contorno toman la forma :

$$R(0) = 1 \quad S(T) = 0$$

Estas condiciones se combinan con las ecuaciones de ondas acopladas para obtener **S(0)**, que es la onda (imagen) difractada por el holograma, resultando :

$$S(0) = \frac{-i}{(i\xi/v) + [1 - (\xi/v)^2]^{1/2} \coth(v^2 - \xi^2)^{1/2}}$$

donde : $\xi = \delta\beta T \cos\theta_0$

δ = desviación angular de la incidencia Bragg

$\beta = 2\pi n_0/\lambda_{\text{aire}}$

θ_0 = ángulo de Bragg para los planos de difracción

n_0 = índice de refracción promedio

n_1 = índice de refracción de la emulsion

$$v = \pi n_1 T / \lambda \cos\theta_0$$

Puesto que se ha asumido la amplitud unitaria de la onda incidente en $z = 0$, la eficiencia del holograma es :

$$\eta = S(0) \cdot S(0)$$

Si se considera que el ángulo de incidencia es exactamente el ángulo de Bragg (coincidencia espacial de la luz reproductora con la que tenía inicialmente la referencia), entonces el factor de incidencia Bragg $\xi = 0$, y la eficiencia va a depender exclusivamente del factor v .

A diferencia de los hologramas de transmisión donde la máxima eficiencia posible depende críticamente del producto del espesor del holograma (T) y de las constantes de acople, en el caso de reflexión la eficiencia máxima posible se alcanza asintóticamente incrementando v :

$$\begin{aligned} \text{Así por ejemplo :} \quad \eta &= 43 \% \quad \text{para } v = \pi / 4 \\ \eta &= 84 \% \quad \text{para } v = \pi / 2 \\ \eta &= 96 \% \quad \text{para } v = 3 \pi / 4 \end{aligned}$$

Para un cierto espesor T de la placa holográfica y un arreglo dado de rayos referencia y objeto, v es un parámetro proporcional a la amplitud de la variación del índice de refracción n_1 producido por el tiempo de exposición y procesado del holograma.

III PARTE EXPERIMENTAL

En lo que sigue describimos los elementos básicos del sistema holográfico construido (UNI), así como el método experimental seguido para la elaboración de los hologramas.

La primera preocupación del experimentador es encontrar un local adecuado :

- * Oscuro / La película holográfica es muy sensible a la luz.
- * Antivibracional / Las vibraciones mecánicas y ruidos constituyen un elemento destructivo, ya que los patrones de luz que son grabados en la placa holográfica son del orden de la longitud de onda y menores.

III A Elementos ópticos utilizados para la cámara Holográfica

- 1 Banco Óptico
- 2 Laser
- 3 Filtro espacial
- 4 Obturador
- 5 Espejos deflectores

6 Montura de la placa Holografica

7 Placa Holografica

A 1 Banco Óptico

El banco óptico juega un papel sumamente importante en la eliminación de vibraciones indeseables, por tal motivo se usa mesas graníticas sumamente masivas, tal que la frecuencia de resonancia ν_0 sea suficientemente pequeña :

$$\nu_0 = 1 / 2 \pi (Mk)^{1/2} \quad \text{donde: } M = \text{masa del banco}$$

$$K = \text{constante elástica}$$

En nuestro caso se empleo una mesa de acero inoxidable de 50 kg. y 18 cm de radio.

Para reducir aun mas el efecto de las vibraciones se empleo adicionalmente un juego de postes de amortiguación neumática (Ver Figura III.1).

Sobre la mesa de acero se monto una estructura metálica de 1.8 m, en la que se dispuso la mayoría de los elementos ópticos del sistema.

A 2 Laser

El Laser usado en la experiencia fue de Helio - Neón marca "Metrologic" de 8 mW de potencia. Posibilitando irradiancias netas sobre las placas, con máximo del orden de 0.1 W /m^2

En nuestro equipo el Laser se dispuso en la parte superior de la torreta óptica, apuntando al centro de la mesa de acero

A 3 Filtro espacial.

El Filtro Espacial esta constituido de un objetivo de

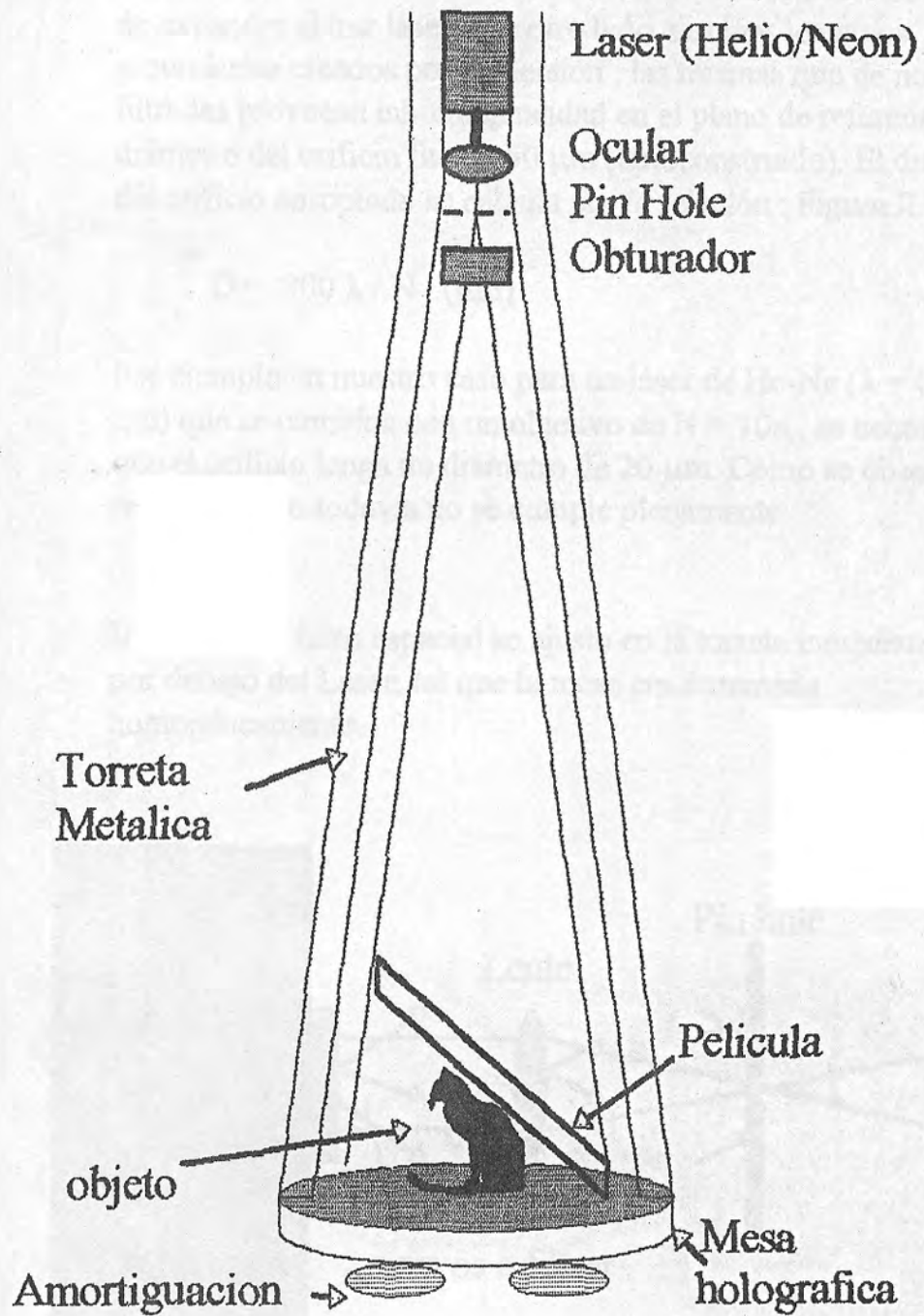


Figura III.1 : Representacion esquematico del sistema holográfico de geometria vertical . Arreglo particular para el caso de Hologramas de reflexion.

microscopio y de un orificio "Pin hole" y tiene la doble función de expandir el haz láser y de otro lado eliminar los rayos secundarios creados por dispersión, las mismas que de no ser filtradas provocan inhomogeneidad en el plano de referencia. El diámetro del orificio fue de 50 μm (autoconstruido). El diámetro del orificio apropiado se calcula por la relación : Figura II.2

$$D = 300 \lambda / N \text{ (}\mu\text{m)}$$

Por ejemplo en nuestro caso para un láser de He-Ne ($\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$) que se combina con un objetivo de $N = 10x$, es necesario que el orificio tenga un diámetro de 20 μm . Como se observa este requerimiento todavía no se cumple plenamente

El sistema de filtro espacial se ajusto en la torreta inmediatamente por debajo del Laser, tal que la mesa era iluminada homogéneamente.

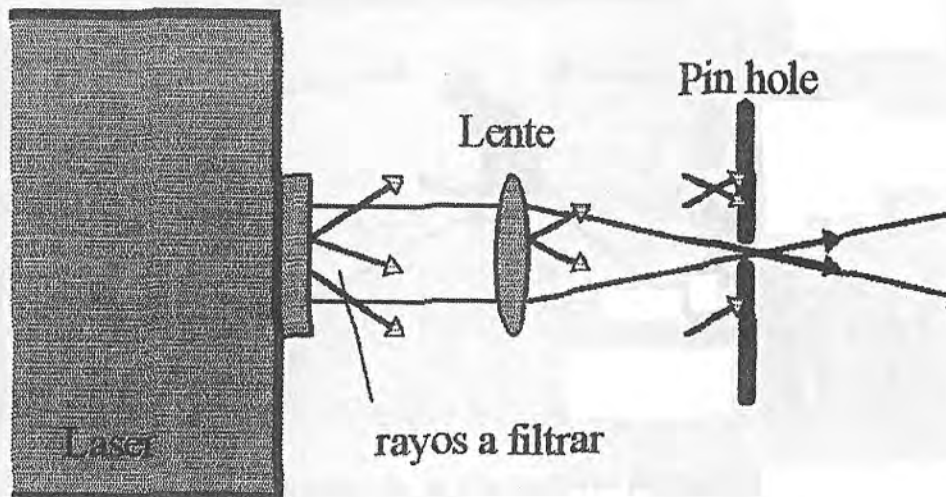


Figura III.2 . Sistema expansor de haz y filtro espacial.

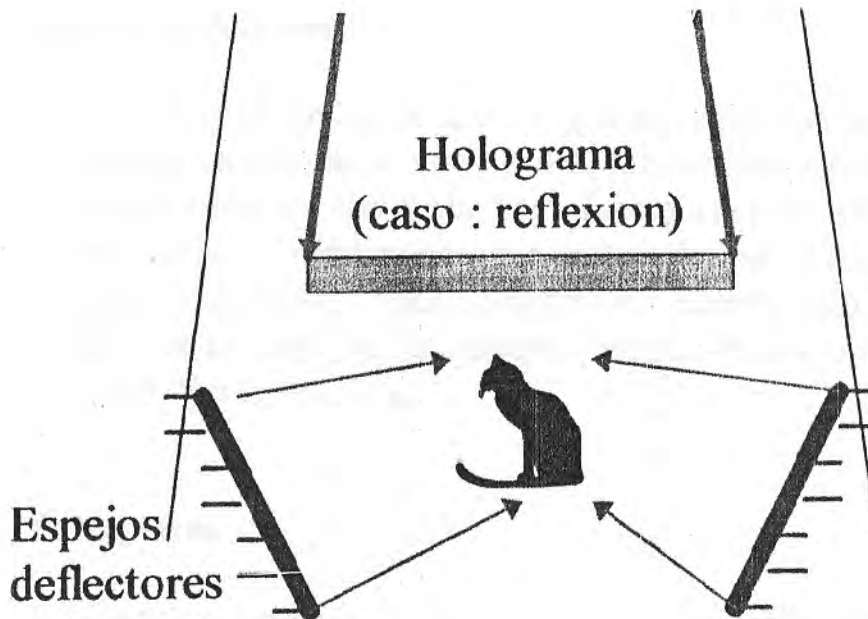
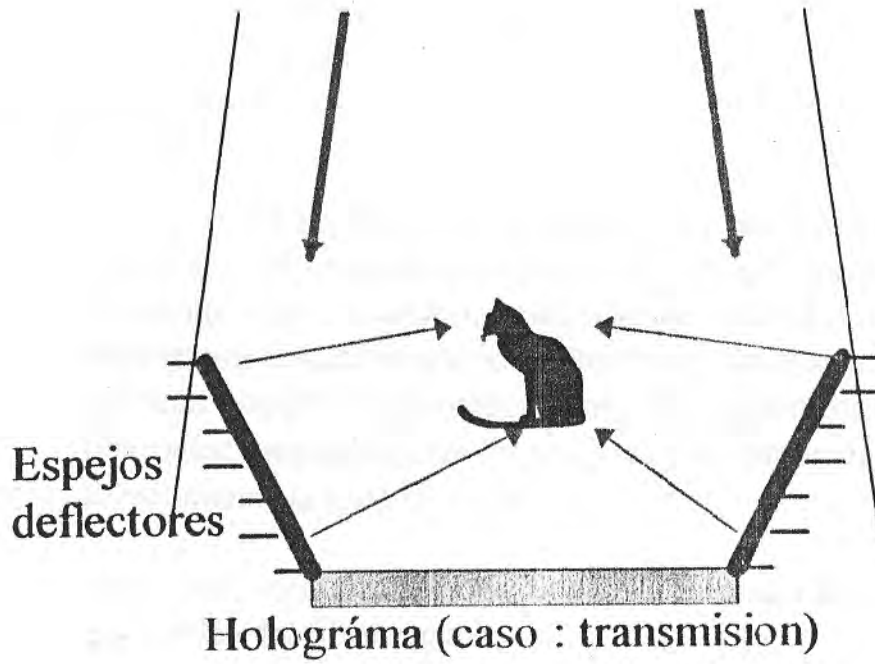


Figura.III.3 . Detalle de la disposicion de elementos para la elaboracion de hologramas, con el sistema holográfico vertical / UNI.

A 4 Obturador

Debido a que las dosis de irradiancia láser recomendadas para las placas son del orden de : ($100 \mu\text{J}/\text{cm}^2$), se hace necesario dosificar los tiempos de exposición, desde algunos segundos a minutos. Motivo por el cual se emplea obturadores electrónicos que ejecutan esta labor automáticamente. En nuestro caso usamos un obturador simple (cámara fotográfica) y el tiempo de exposición lo estimamos con un cronometro.

La posición del obturador en la torreta fue a una altura intermedia por debajo del filtro espacial

A 5 Espejos Deflectores

En la tarea de grabación del holograma, se hace necesario hacer un ajuste mutuo de la intensidad de luz que incide tanto sobre el objeto, como así con el que llega directo a la placa (Referencia). Esta función se realiza convencionalmente con un espejo selectivo rotatorio : "Beam Splitter". En nuestro caso se tuvo que elaborar un juego de semiespejos (método de evaporación) para tal fin. Ver figura III.3.

A 6 Portaplacas

El sistema portador de placas debe permitir de un lado colocar debidamente las placas holograficas y de otro lado permitir un fácil manipuleo en completa oscuridad.

En nuestro caso se fabrico diversas portaplacas de acrílico, seleccionandose la mejor de ellas (ver figura III.4) por su versatilidad y facilidad de manejo.

El portaplacas se coloca sobre la mesa holografica

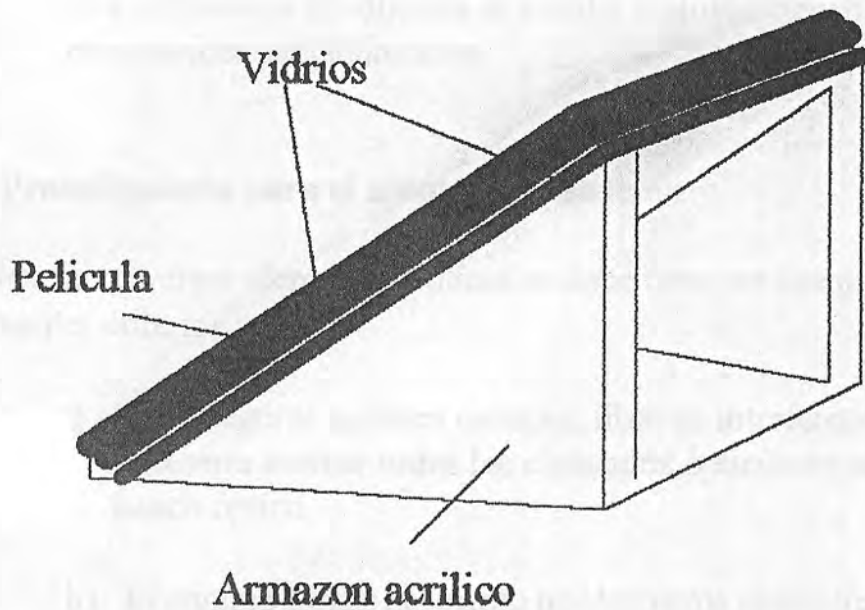


Figura III.4 . Representacion esquematica del portaplacas y detalle del montaje de la pelicula

A 7 Placa Holografica

Debido a que en el patrón de interferencias que forman el holograma, las distancias medias son del orden de magnitud de la longitud de onda que se emplea, se hace necesario usar una película de alta resolución para el acto de grabación : Placa holografica. Las placas empleadas en holografía, comercialmente disponibles tienen resoluciones de 2000 a 2500 líneas por mm. Las placas utilizadas en este caso fueron de Eastman Kodak (649 F)

Un detalle importante en el montaje en el portaplaca es la ubicación correcta, según el lado sensible de la placa (localización de la emulsión), que debe estar dirigido en la dirección de incidencia de los rayos .

Otro detalle importante constituye el hecho que luego de instalar la película holografica en la mesa holografica se debe esperar de

15 a 20 minutos para poder hacer la respectiva exposición, ya que las vibraciones producidas al instalar o ajustar tienen que desaparecer paulatinamente.

III B Procedimiento para el montaje del sistema

Al colocar los diversos elementos ópticos se debe tener en cuenta en general los siguientes criterios :

- a) Para asegurar un buen montaje, libre de interferencias es necesario montar todos los elementos ópticos en un solo banco óptico.
- b) El camino óptico recorrido por los rayos objeto/referencia deben ser del mismo orden de magnitud
- c) El ángulo entre los rayos Objeto / Referencia no debe ser ni muy grande ni muy pequeño. En general, ángulos entre 30 y 60 grados son los más adecuados
- d) La ubicación de la placa holográfica debe ser tal, que en la visualización la fuente de luz llegue a la placa del mismo lugar y la imagen del objeto aparezca también en la misma posición. Actuando la placa holográfica revelada luego como si fuera una pequeña ventana.
- e) Arreglo de las componentes ópticas de la cámara holográfica Vertical :

En las distintas etapas de montaje se debe tener en cuenta el mantener un buen balanceo del sistema.

Después de colocar la mesa de acero a nivel se instala la torreta óptica y sucesivamente cada uno de los elementos indicados, procediendo en cada caso a un ajuste individual, de tal modo que se deja los elementos centrados y operativos.

La exigencia de igual camino óptico para los rayos Objeto/Referencia proviene del hecho de evitar la posibilidad de que dos rayos que partan del Laser a distinto tiempo tengan diferentes propiedades debido a su estabilidad en el tiempo.

Para una mejor iluminación del objeto , usualmente de una remisión mucho mas débil, los rayos de Objeto y Referencia son expandidos por filtros espaciales posicionados en el camino de los rayos. El tamaño de los rayos expandidos puede ser ajustado luego por una localización conveniente de los filtros. En el caso concreto de este trabajo se utilizo un conjunto de espejos y semiespejos. Es importante anotar que el reflejo de un espejo no debe llegar directamente a la placa holografica, pues de hacerlo producirá una interferencia con el haz de referencia superponiéndose al retrato holografico.

La intensidad del rayo de referencia que incide en la placa holografica debe ser normalmente del orden de dos a tres veces la intensidad del rayo objeto

Los objetos a ser holografiados se colocan directamente sobre la mesa holografica, o pegados sobre soportes acrílicos, para facilitar las tomas, adicionalmente se monta un sistema de espejos, tal que, tanto la placa como el objeto sean iluminados simultáneamente. (figura III.3)

En el gráfico III. 1 se muestra el esquema final del arreglo global de la cámara holografica :

III C Materiales y métodos de procesamiento de hologramas

C 1 Revelado

Como reveladores se usaron principalmente dos fórmulas usuales /Ref 02/Ref 03/:

Formula 1 :
 a Agua : 1 l
 b Metol : 2 g
 c Sulfito sódico anhidro : 45 gr.
 d Hidroquinona : 8 g
 e Carbonato sódico anhidro : 50 g
 f bromuro potásico : 5 g

Formula 2 :
 a Agua : 1 l
 b Metol : 2.5 g
 c Ácido ascorbico : 10 g
 e Bromuro de potasio : 2 g
 f Kestronol : 2.5 g
 g carbonato de sodio : 48 g

C 2 Fijado

Para la fijación se trabajo con la formula

Formula 1 :
 a agua : 1 l
 b Tiosulfato sódico : 240 g
 c sulfito sódico anhidro : 10 g
 d bisulfito sódico : 25 g

C 3 Lavado Final

Para el lavado final se empleo la formula :

Formula 1 :
 a Agua : 1 l
 b Ferricianuro potasico : 8g
 c Bromuro potasico : 7 g

C 4 El proceso holografico :

a Exposición de la placa a niveles de irradiancia del orden de
 * 100 mW/m², lo cual teniendo en cuenta el láser

empleado significativo tiempos de exposición de 30 segundos a 1 minuto

** La medición de la irradiancia se efectuó con un radiómetro construido y calibrado para este fin.*

- b Revelado de 5 minutos*
- c Enjuague de la placa por 1 minuto*
- d Fijar la placa por 3 minutos*
- e Enjuagar en agua corriente por 10 minutos*
- f Lavar en ferricianuro por un minuto*
- g Enjuague final en agua corriente por 5 minutos*

C 5 Procedimiento experimental de optimización :

- a Mantener constantes los parámetros relativos al procesamiento de la placa holográfica (revelado, fijado, lavado)*
- b Variar sistemáticamente los tiempos de exposición y niveles de iluminación relativa (placa holográfica, objeto).*

IV RESULTADOS

Las aproximaciones sistemáticas se realizaron teniendo en cuenta los siguientes criterios :

IV A Iluminacion constante

- A 1 Manteniendo una iluminación uno a uno (objeto/placa) pero variando los tiempos de exposición desde 45 a 60 segundos :

Muestras 01 a 40 (Catalogo Hol/UNI 01)

- A 2 Manteniendo una iluminación uno a uno y variando los tiempos de exposición desde 45 a 30 segundos :

Muestras 41 a 80 (Catalogo Hol/UNI 01)

IV B Tiempo de exposicion constante

- B 1 Manteniendo un tiempo de exposición constante de 45 segundos, se vario la iluminación relativa (objeto / placa) desde un factor 1 a un factor 0.3

Muestras 81 a 140 (Catalogo Hol/UNI 01)

- B 2 Manteniendo un tiempo de exposición constante de 45 segundos, se vario la iluminación relativa (objeto / placa) desde un factor 1 a 3.

Muestras 141 a 200 (Catalogo Hol/UNI 01)

IV C Iluminación selectiva constante.

C 1 Manteniendo una iluminación tres a uno (objeto / placa) se vario los tiempos de exposición de 45 a 60 segundos

Muestras 201 a 260 (Catalogo Hol/UNI 01)

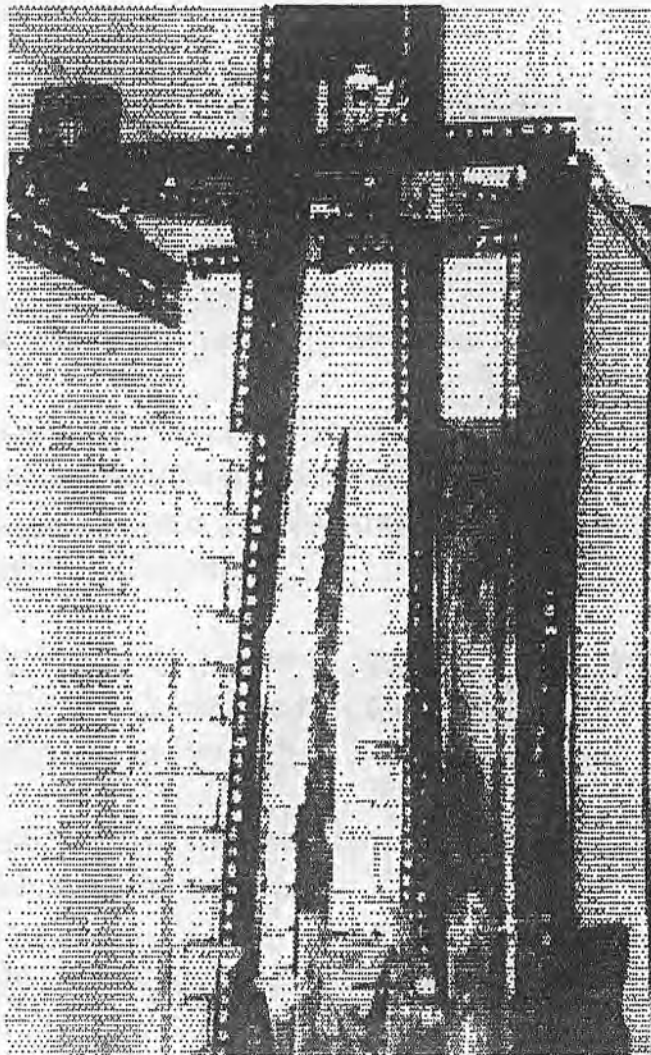


Figura IV.1 : Sistema Holográfico de geometria vertical construido y optimizado en este trabajo

V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los resultados obtenidos son buenos , desde un punto de vista global, ya que las muestras obtenidas finalmente, luego de refinar la técnica permiten ya una buena visualización tridimensional del objeto, a partir de una fuente luminosa puntual (foco) o directamente al sol.

En la practica se demuestra que el sistema tiene las siguientes ventajas :

- a El camino óptico recorrido por el haz láser es menor que en los sistemas holográficos convencionales y es directo (en ciertos casos incluso no se tiene necesidad de introducir espejos deflectores).
- b El balanceo de la torre de exposición permite lograr equilibrios mecánicos mas duraderos, posibilitando el empleo de Lasers de baja potencia (cerca de 1 mW)
- c Al reducir los elementos ópticos usuales se incrementa la estabilidad del arreglo .
- d Debido al espacio reducido de trabajo , el operador trabaja con mayor soltura.

Es de observar el efecto critico de la combinación de luces y tiempos de exposición total de la muestra.

- a Para tiempos de exposición relativamente largos , la imagen toma un color verde oscuro (azulado), obteniéndose una imagen indefinida (muy oscura)

- b Para tiempos de exposición relativamente cortos, la imagen toma un color rojizo pálido, obteniéndose una imagen indefinida (débil)
- c Para tiempos de exposición correctos, la imagen toma un color verde brillante, resaltando *nítidamente la imagen bajo un gran ángulo de observación* (ejemplo : la muestra 230 o 235)

No obstante los buenos resultados obtenidos, estos son aun factibles de mejorar , corrigiendo en los siguientes puntos :

- a Inhomogeneidad en la distribución de la luz y por ende presencia de algunas zonas mas claras y/o oscuras, debido esencialmente a la inhomogeneidad misma del láser empleado.

Esto se corrige disponiendo de un láser de mayor potencia (20 mW), lo que a la vez permitiría la confección de hologramas de mayor tamaño.

- b Presencia de líneas de interferencia (líneas claras y oscuras) en la reproducción holografica, *debido básicamente a un procesamiento incompleto del holograma*

Según nuestras referencias, ese problema se soluciona , utilizando reactivos químicos apropiados.

Es de anotar que la mejor selección en la distribución de luces depende fuertemente de la muestra a reproducir.

En Resumen :

Este trabajo ha demostrado la factibilidad de realizar reproducciones holograficas en base a un equipo simple desarrollado en la UNI para tal fin.

Existen aun pequeños detalles factibles de mejorar , lo cual será posible optimizando de manera sistemática el procedimiento holografico seguido.

Recomendaciones :

Para que el equipo holografico desarrollado tenga mayores posibilidades de ser usado de manera ordinaria, se hace necesario .

- a automatizar varios pasos que dependen actualmente del criterio del operador
- b Lograr que el equipo sea transportable, para poder realizar tomas en lugares fuera del laboratorio
- c Elaborar un proyecto para la realización de hologramas de gran área (30 cm x 40 cm) y de cuerpos vivos o en movimiento.

VI BIBLIOGRAFIA

- /1/ R. D. Bahuguna, D. Malacara
"Holography" , Methods of experimental Physics
Vol. 26 , Academic Press, USA 1988
- /2/ H. J. Tung
"The one beam transmission hologram"
The physics teacher, USA Feb. 1980 (129 - 133)
- /3/ H. M. Smith
"Holographic recording materials"
Topics y applied Physics, 1985, Vol 20 USA
- /4/ M. Francon
"Holografia"
Ed. Paraninfo, Madrid , 1972
- /5/ F. Unterseher, B. Schlesinger, J. Harrison
"Holography Handbook : making holograms
the easy way"
Ross Books, N.Y. (1982)
- /6/ C. Eyzaguirre , A. Valera
"Desarrollo de un sistema Holográfico de geometria vertical"
XI Simposio Peruano de Fisica. Lima .Agosto 1995
- /7/ H. Kogelnick
Bell Syst. Tech. J. 48 , 2909 (1969)

ANEXOS :

A ONDAS

A I Características generales

La luz es una forma de energía , a la cual es sensible nuestra vista. Los fenómenos macroscópicos como la propagación de esta energía en el espacio y tiempo se explican acertadamente mediante el modelo ondulatorio. No obstante los procesos en el microcosmos como la absorción y la emisión de luz por la materia encuentran su mejor explicación en el modelo corpuscular.

Según el modelo ondulatorio la luz se propaga de forma análoga al de las ondas en la superficie del agua. Al caer una piedra al agua se observa en la superficie una serie de ondas concéntricas que se alejan del punto en que la piedra golpeo el agua

Las ondas se mueven con cierta velocidad y la distancia entre las crestas permanece constante. Esta distancia se llama longitud de onda. La frecuencia (ν) o número de oscilaciones por segundo con que oscila la cresta esta relacionada con la velocidad de propagación (V) y la longitud de onda (λ) por la relación:

$$V = \lambda \nu$$

La altura máxima que alcanza la cresta para uno u otro lado con

respecto al nivel normal de la superficie se llama amplitud.

Un valor de suma importancia es la Intensidad de la onda, que es a la vez una medida de la cantidad de energía que transporta ; la intensidad de la onda es proporcional al cuadrado del valor de la amplitud y por razones practicas se toma igual a dicho cuadrado.:

$$I = (\text{Amplitud})^2$$

En el caso de la luz lo que se producen son campos eléctricos y magnéticos que oscilan como lo hace el agua a nivel de su superficie.

Las ondas luminosas son aquellas cuya frecuencia esta comprendida entre 4.5×10^{14} y 7.5×10^{14} oscilaciones por segundo y constituyen una parte muy pequeña dentro del conjunto de las ondas electromagnéticas.

El color de la luz esta determinado por la frecuencia de la onda. Cuando una onda viaja a través de distintos medios esta frecuencia permanece constante, variando la velocidad y longitud de onda de forma que se satisfaga la relación : $v = \lambda \nu$. La velocidad de propagación de la luz en el aire es de 300,000 km/s y disminuye cuando se propaga en otros medios como el agua y el vidrio. El cociente entre las velocidades o las longitudes de onda de la luz en el aire y en otro medio es lo que se conoce como el índice de refracción. Para el agua vale 1.33 y para el vidrio alrededor de 1.5.

La luz procedente del sol o una bombilla esta compuesta por un conjunto de ondas de diferente frecuencia (luz blanca) que se pueden separar por ejemplo al refractarse y reflejarse la luz del sol en las gotitas de agua en el aire (Arco iris). La luz del Laser en cambio es de una sola frecuencia (luz monocromática).

Usualmente en los diversos experimentos de óptica se trabaja con fuentes de luz cuasimonocromática, en la aproximación de ondas planas :

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 \exp i(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r})$$

Esta ecuación corresponde a una onda plana que se propaga en la dirección de \mathbf{r} , con una amplitud de campo eléctrico constante \mathbf{E}_0 , que en el caso de propagación en vacío es perpendicular al vector de onda \mathbf{k}_0 . Si la propagación tiene lugar en un medio (sólido), las ecuaciones de Maxwell dan como resultado :

$$k^2 = \mu k_0^2 (\epsilon - i 4 \pi \sigma / \omega)$$

Resultado que permite caracterizar el medio por un índice de refracción complejo n^*

$$k = k_0 n^* = k_0 (n - i \kappa)$$

Donde n es el índice de refracción efectivo y κ el coeficiente de extinción. Lo cual permite reescribir el campo eléctrico :

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 \exp -(\mathbf{k}_0 \cdot \mathbf{r} \kappa) \exp i(\omega t - \mathbf{k}_0 \cdot \mathbf{r} n)$$

Lo cual indica que en presencia de un medio la onda se propaga de modo análogo que en vacío a la misma frecuencia ω , a la velocidad de fase: c/n , pero sufriendo una amortiguación en su amplitud y/o intensidad, esta última caracterizada por un coeficiente de absorción α :

$$\alpha = 2 k_0 \kappa = 4 \pi \kappa / \lambda$$

Usualmente en experiencias de óptica no se considera efectos de absorción

$$\Rightarrow \alpha \cong 0$$

Asimismo, en la gran mayoría de experiencias de óptica los procesos observados son estacionarios, por tal motivo el factor $\exp(i \omega t)$ es usualmente omitido (promedio = 1), interviniendo solo explícitamente en procesos temporales, como es el caso de la interacción de luz con osciladores atómicos.

AII Superposición de ondas

Consideraremos a continuación la interacción de dos ondas que se suponen tienen la misma frecuencia (mismo color) y la misma amplitud (por tanto la misma intensidad). Al superponerse espacialmente pueden darse los siguientes casos :

a Coincidencia en fase.

Las dos ondas coinciden perfectamente . La onda resultante es la suma de ambas, por tanto la amplitud se duplica y la intensidad se cuadruplica (figura A.1).

INTERFERENCIA CONSTRUCTIVA (En fase)

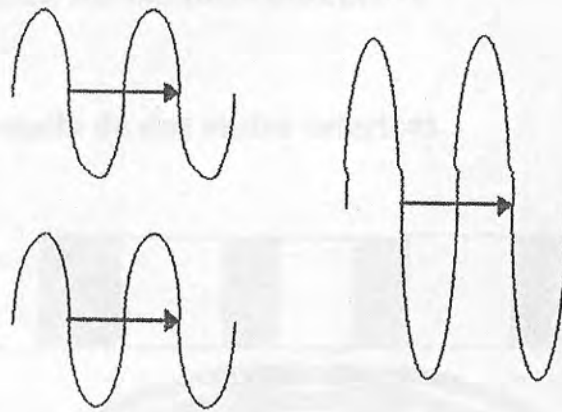


Figura A.1 . Interferencia constructiva

b Coincidencia en oposición de fase.

En este caso los máximos de una coinciden con los mínimos de la otra. La amplitud resultante es nula , de igual modo que la Intensidad que corresponde.(figura A.2).

En todos los casos restantes, la amplitud resultante es intermedia a la obtenida en estos casos extremos. Este proceso básico de combinación de ondas se denomina Interferencia

INTERFERENCIA DESTRUCTIVA (En antifase)

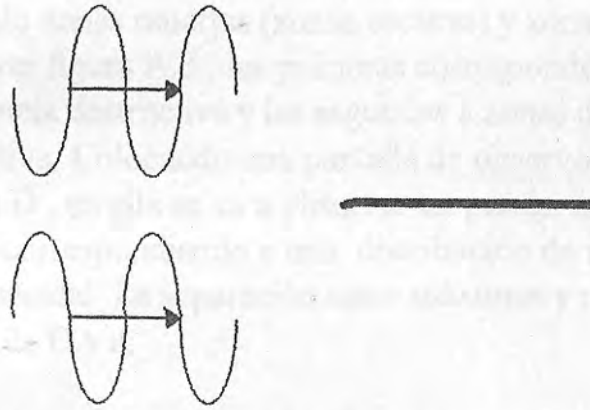


Figura A.2 Interferencia destructiva.

A III Interferencia de dos ondas esfericas

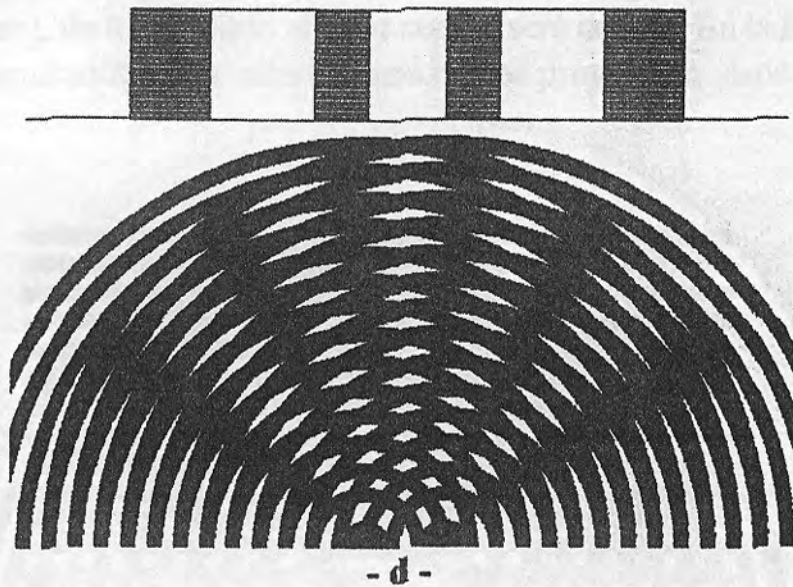


Figura A.3 . Interferencia de dos ondas esfericas.

Al incidir una onda plana monocromática sobre una pantalla que tiene dos orificios, separados una distancia b , cada uno de los orificios va a constituirse a su vez en una fuente puntual de ondas esféricas, cuyas ondas van a interferir mutuamente en el espacio, definiendo zonas muertas (zonas oscuras) y zonas activas (zonas claras), ver figura A.3, las primeras corresponden a zonas de interferencia destructiva y las segundas a zonas de interferencia constructiva. Colocando una pantalla de observación a cierta distancia D , en ella se va a observar un patrón de líneas claras y oscuras, correspondiendo a una distribución de intensidades cuasisinusoidal. La separación entre máximos y mínimos depende solo de λ , D y d .

A IV Interferencia de una onda plana y una circular

Al superponer una onda plana y una circular coherentes (igual λ , e igual fase), la superposición mutua producirá una serie de círculos concéntricos (oscuros y luminosos) en una pantalla frente a las fuentes. El círculo central "Spot" será de máxima iluminación (como es aquí el caso), si las fuentes tienen igual sincronización (en fase), de lo contrario el Spot central será oscuro. En la figura A.5 se esquematiza esta interferencia en una proyección plana.

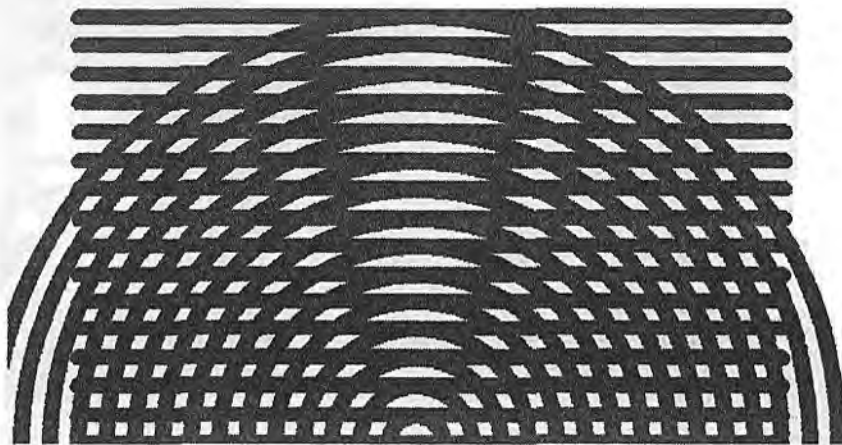


Figura A.4 . Interferencia de una onda plana y una esférica

A V Película delgada absorbente

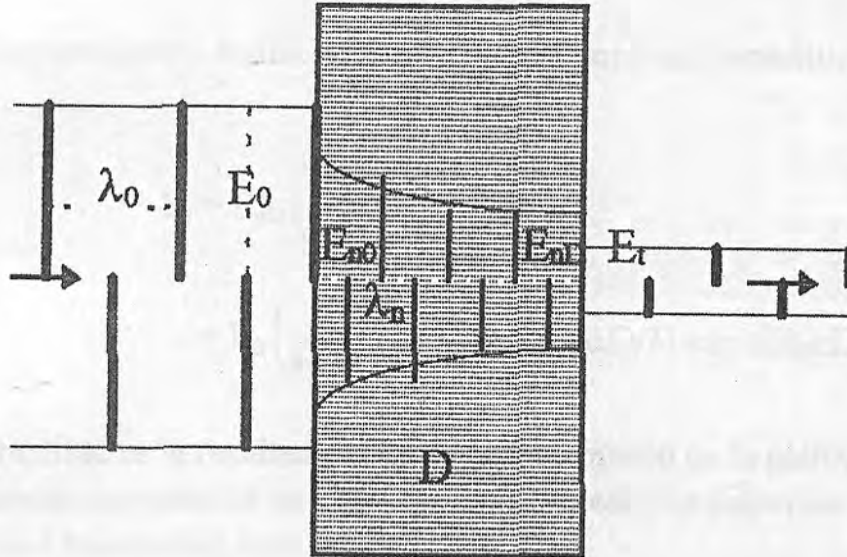


Figura A.5 : Representación esquemática de la amortiguación que sufre un rayo al pasar un medio absorbente.

Teniendo en cuenta la incidencia normal de una onda plana (longitud de onda λ_0) sobre un material de espesor uniforme D y de índice de refracción complejo n^* , analizamos la onda transmitida resultante E_t . Al incidir la onda de amplitud E_0 sobre la película, inmediatamente en la interfase, una fracción será reflejada (E_r) y otra penetrará en el material: E_{n0} (Campo eléctrico dentro del material al espesor $d=0$)

$$E_{n0} = \left(\frac{2}{1+n^*} \right) E_0$$

Al progresar la onda dentro del material (figura A.5), de un lado el valor de la fase instantánea va a depender del camino óptico recorrido ($n d$) y del otro lado la amplitud va a sufrir una amortiguación exponencial. Al espesor D , la amplitud de la onda será entonces :

$$E_{nD} = E_{n0} \exp -(\alpha D/2) \exp -i(k_0 n D)$$

$$= E_0 \left(\frac{2}{1+n^*} \right) \exp -(\alpha D/2) \exp -i(k_0 n D)$$

Inmediatamente a la salida de la película, la amplitud transmitida E_t será :

$$\begin{aligned} E_t &= E_{nD} \left(\frac{2n^*}{1+n^*} \right) \\ &= E_0 \left(\frac{2}{1+n^*} \right) \left(\frac{2n^*}{1+n^*} \right) \exp -(\alpha D/2) \exp -i(k_0 n D) \end{aligned}$$

Esta amplitud es la resultante total de la transmisión de la película y permanece constante en su trayectoria en el medio no dispersor. La intensidad transmitida será igual a $|E_t/E_0|^2$.

En este caso no se tienen en cuenta las reflexiones múltiples dentro de la película, ya que debido a la absorción del medio, estas se amortiguan rápidamente.

A VI Película Delgada no absorbente

Si se trata de un material no absorbente $\Rightarrow \alpha = 0$ luego $n^* = n$.

En este caso, las reflexiones múltiples dentro de la película van a lograr salir y sumarse a la onda transmitida, originando interferencia. Los coeficientes de transmisión y de reflexión en amplitud individuales son :

$$t_{21} = \left(\frac{2}{1+n} \right) \quad t_{12} = \left(\frac{2n}{1+n} \right)$$

$$r_{12} = \left(\frac{n-1}{n+1} \right) = -r_{21}$$

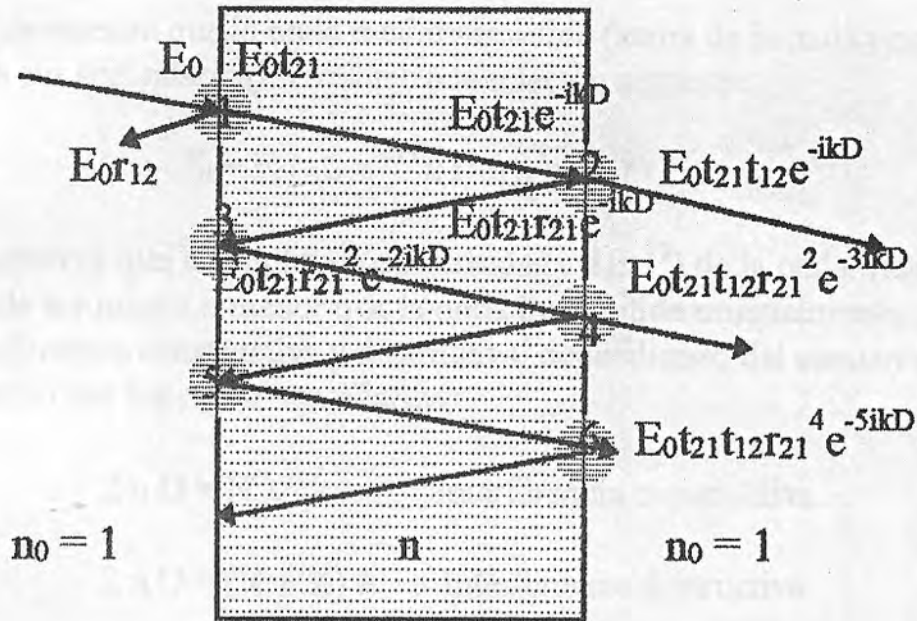


Figura A.6 : Representación esquemática de las distintas reflexiones múltiples que tienen lugar en una película delgada y su contribución al rayo transmitido.

En base a estos valores, se evalúa las reflexiones múltiples que generan las ondas secundarias (figura A.6); en este caso $k = nk_0$:

En el punto (2) el valor de la onda reflejada va a ser :

$$E_0 t_{21} r_{21} e^{-ikD} \text{ donde: } k = n k_0 .$$

En el punto (3) la onda reflejada va a ser : $E_0 t_{21} r_{21}^2 e^{-2ikD}$

La onda que es transmitida finalmente en el punto (4) será :

$$E_0 t_{21} t_{12} r_{21}^2 e^{-3ikD}$$

El segundo secundario que emerge por el punto (6) va a ser a su vez :

$$E_0 t_{21} t_{12} r_{21}^4 e^{-5ikD}$$

Se demuestra que la onda total transmitida (suma de la onda original con sus secundarios) se reduce a la relación siguiente :

$$E_t = E_0 t_{21} t_{12} e^{-ikD} / (1 - r_{21}^2 e^{-2ikD})$$

Se observa que la amplitud (o intensidad : $|E_t|^2$) de la onda transmitida puede ser mayor o menor que la onda transmitida originalmente: interferencia constructiva y destructiva, dependiendo del camino óptico seguido por los rayos secundarios :

$$2 n D = N \lambda \quad : \text{ Interferencia constructiva}$$

$$2 n D = (N + \frac{1}{2}) \lambda \quad : \text{ Interferencia destructiva}$$

N : Orden del máximo de la interferencia

B DIFRACCION

Fue Huygens, quien en 1654 propuso la teoría ondulatoria para explicar el comportamiento de la luz en los fenómenos de refracción y reflexión. Según Huygens la luz que incide en un medio va a excitar centros de irradiación (osciladores), los que a su vez constituyen nuevas fuentes de luz, reemitiendo homogéneamente en el espacio, al reencontrarse sus frentes de onda se sobrelapan dando lugar a distintos efectos dependiendo de las geometrias y medios involucrados. En particular por el fenómeno de Difraccion se comprobó que la luz no viaja siempre en línea recta.

B I : Difraccion por una rendija

Cuando un haz de luz monocromático (rayo), pasa sobre una rendija cuya separación es de algunos micrómetros e incide luego en una pantalla , la observación detallada en la pantalla permitirá comprobar que de un lado en la zona de sombra aparecen también

líneas luminosas y de otro lado que en la zona originalmente iluminada aparecen líneas oscuras (figura B.1). Estos efectos son explicados plenamente por la teoría de Difracción.

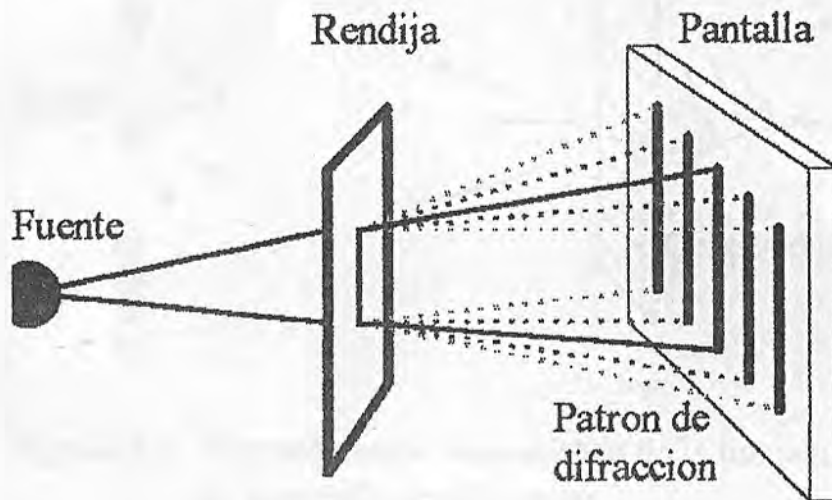


Figura B.1 . Representacion esquematica del efecto de difraccion por una rendija.

B II : Rejilla de Difraccion

Una rejilla de difracción clásica es un elemento óptico formado de un material (transparente o reflejante), sobre el que se han formado un numero grande de líneas paralelas y equidistantes (cerca de 600 líneas por mm).

Si una rejilla (transparente) se ilumina perpendicularmente con una fuente de luz monocromática (lampara de sodio), se va a observar del otro lado de la rejilla un conjunto de imágenes virtuales de la fuente original que aparentan estar distribuidos simétricamente a ambos lados de la fuente (patrón de difracción) esas imágenes constituyen los denominados ordenes resultante y cuyo ángulo aparente de origen permite encontrar la longitud de onda de la fuente. Mas aun, longitudes de onda mayores (al rojo) permiten una mayor separación que longitudes de onda menores (al violeta). (ver figura B.2)

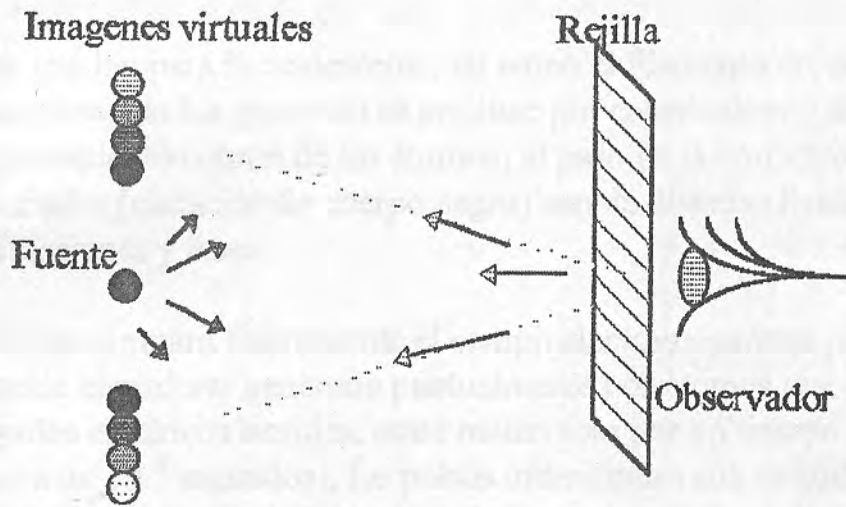


Figura B.2 . Representación esquemática de la función de una rejilla de difracción

La propiedad descrita es empleada en la actualidad para su uso como elemento dispersor; ya que colocando una fuente luminosa compuesta (muchos colores) en los respectivos ordenes aparecerá en cada uno de ellos la distribución de colores que componen la fuente (Espectro). Si se utiliza como fuente una lámpara de descarga unifilar (por ejemplo de mercurio), el patrón de difracción que se observa será 4 imágenes virtuales de la fuente en los cuatro colores típicos de mercurio (naranja, amarillo, verde, azul).

C COHERENCIA

En una lámpara incandescente, tal como el filamento de una lámpara de tungsteno, la luz generada se produce por calentamiento de la red (movimiento común de los átomos) al paso de la corriente. Los fotones emitidos (radiación de cuerpo negro) son de distintas frecuencias, direcciones y fases .

En una lámpara fluorescente el campo electromagnético producido se puede considerar generado puntualmente por átomos que radian como dipolos eléctricos simples, estos radian solo por un tiempo muy corto (cerca de 10^{-9} segundos), los pulsos individuales son emitidos en intervalos aleatorios, de igual modo los ejes radiativos dipolares tienen también orientaciones diversas, produciendo luz no polarizada.

El campo electromagnético producido por cualquiera de estas dos fuentes en cualquier punto **P** tendrá como resultante un campo eléctrico que varía aleatoriamente en dirección y en su fase de oscilación, aun incluso usando un polarizador, la fase de la componente del campo eléctrico que llega a **P** variará arbitrariamente ; El caso descrito corresponde a una fuente incoherente.

En un láser, la emisión de fotones es estimulada por un sistema estacionario de ondas electromagnéticas generados en una cavidad resonante de manera análoga a los **Modos** Fabry-Perot , por este motivo el campo electromagnético asociado con cada fotón emitido está en fase con la onda estimulante (fuente), consecuentemente los campos dipolares asociados con los átomos radiantes en el resonador siempre oscilan en fase con el campo produciéndose la radiación estimulada, de igual modo, la luz que abandona la cavidad oscila también en la misma fase . Los láseres son por tanto fuentes de luz coherentes.

Coherencia temporal y espacial

Etimológicamente, la palabra **coherente** significa "Ordenados juntos" Las fases en una fuente ideal coherente están sincronizadas espacial y temporalmente.

Una fuente de luz que oscila a la frecuencia ν_0 y amplitud α constante por un cierto tiempo T (por ejemplo el tiempo de colisión medio) emite un tren finito de ondas compuesto de un rango de frecuencias alrededor de ν_0 y de ancho espectral $\Delta\nu = 1/T$ (espectro Fourier). La longitud del tren de ondas resultante es : $L = c T = c/\Delta\nu$. Son así las colisiones entre los átomos, los que limitan la coherencia del tiempo de emisión de un átomo. Cuanto mas frecuentes los choques, mas cortos los tiempos de emisión y mas ancha la línea espectral.

Las cantidades T y L son conocidas respectivamente como tiempo de coherencia y longitud de coherencia respectivamente. Estos conceptos son de gran importancia en holografía, ya que efectos de interferencia de buen contraste pueden ser observados solo si la diferencia de caminos ópticos son apreciablemente menor que L .

El hecho que dos rayos de luz de distintas fuentes puedan interferir esta muy ligada también al concepto de coherencia , usualmente ninguna fuente es monocromática ideal, ya que todas, incluso los lasers tienen un ancho espectral, por tal motivo si el tiempo de coherencia de cada rayo es $T_0 = 1/\Delta\nu_0$, la condición de interferencia se cumple siempre y cuando $T_0 \gg T$, donde T es el tiempo de integración o detección del fotodetector empleado.

Por ejemplo, si $T = 10^{-7}$ s y $\lambda = 600$ nm ($\nu = 5 \times 10^{14}$ Hz), el factor $\Delta\lambda_0$ de los rayos interactuantes debería ser menor que 12 fm. En la practica una de las fuentes de luz de ancho de línea mas estrecho, es la línea roja (643.8 nm) de emisión de una lampara de cadmio de baja presión, para la cual $\Delta\lambda_0 = 1300$ fm. Por tal motivo es que, solo con fuentes laser de alta estabilidad, es posible detectar interferencia con fuentes distintas

D HOLOGRAFIA A COLOR

Una desventaja de la técnica holográfica actual es que en el proceso de registro se requiere de una fuente monocromática y potente (Laser), con lo cual las reconstrucciones holográficas son de un solo color.

La base moderna que sirve para la elaboración de hologramas , que reproducen imágenes de color son los trabajos de Lippmann (1891), quien usando placas fotográficas reflejantes con emulsiones gruesas lograba obtener reproducciones en color. Se demostró que en esas placas para cada color se formaba planos sensibilizados ,dependiendo la profundidad de los mismos de la longitud de onda incidente (onda estacionaria), actuando la placa revelada como un reflector selectivo de la luz, ya que solo a ciertas longitudes de onda se suman constructivamente las reflexiones de las distintas capas de profundidad.

El método de color actual utiliza por tanto una emulsión gruesa y se registra el objeto con tres lasers distintos ; de colores : rojo, verde y azul.

E EQUIPOS CONVENCIONALES USADOS EN HOLOGRAFIA / COMERCIALES /

E I Mesa Holografica

La mesa consta de una plataforma de granito (usualmente 1.2 m x 2.00 m x 10 cm), dispuesta sobre un sistema cuádruple de suspensión neumática (aire comprimido)

Sobre la mesa de granito se dispone de una cabina , que permite aislar el arreglo del viento y la luz periférica. En la mesa granítica se acondiciona todos los elementos ópticos.

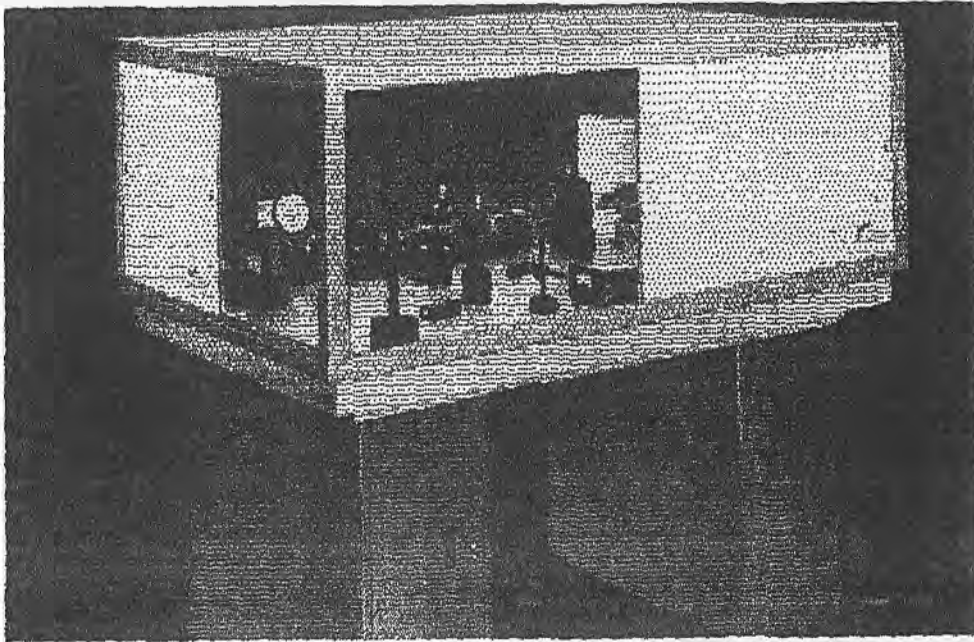


Figura E.1 : Sistema Holográfico JODON

E II Disposición convencional de los principales elementos ópticos de un arreglo holográfico

El haz de un Laser de He-Ne es dividido en dos por un divisor de Haz (beam splitter), el haz que se transmite directamente es filtrado espacialmente, expandido y finalmente llega al objeto a holografíar.

El haz reflejado en el (beam splitter), es reflejado totalmente por un espejo frontal, se conduce también hacia un filtro espacial y un expansor, reflejándose finalmente en otro espejo frontal se hace llegar el haz hacia el portaplacas X-Y, donde se encuentra la placa holográfica

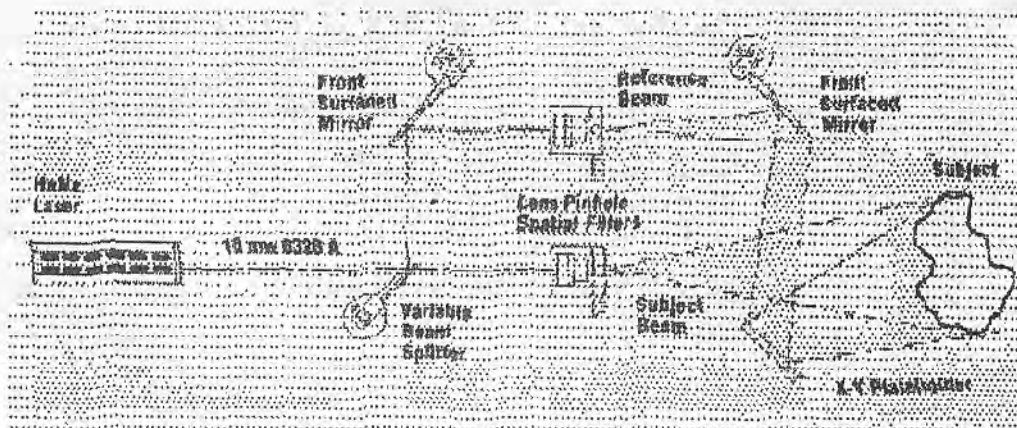


Figura E.2 Componentes del sistema holográfico JODON y trayectorias de los rayos

E III Laser de Helio / Neón

Un láser recomendable : 50 mW, alta potencia, bajo ruido y de gran estabilidad .

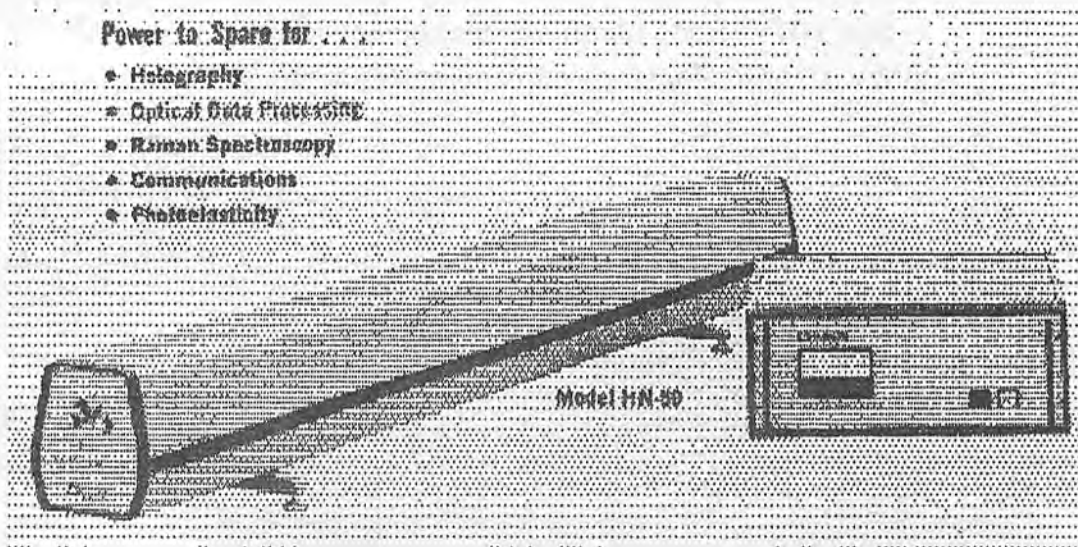


Figura E.3 : Laser de He-Ne 50 mW /JODON

E IV Expansor Telescópico

Beam Expanding Telescope :

De gran apertura (55 mm), de buena performance en lo referente a la deformación del frente de onda ($\lambda/10$), con capa antirreflejante y objetivos intercambiables (de 2x a 60x)

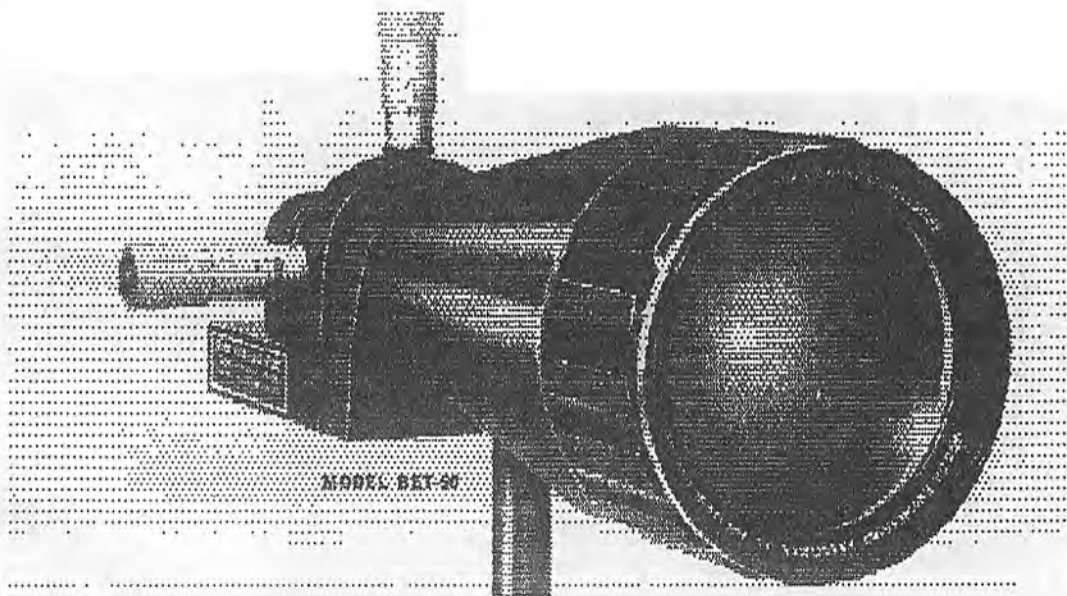


Figura E.4 : Expansor telescopico 50 mm / JODON

E V Filtro espacial

Lens Pinhole Spatial Filter :

El filtro espacial es un dispositivo goniométrico, que consiste de un pequeño agujero desplazable en los ejes X Y y de un objetivo estándar de microscopio movable en el eje Z. Los objetivos están recubiertos con capas anti-reflejantes.

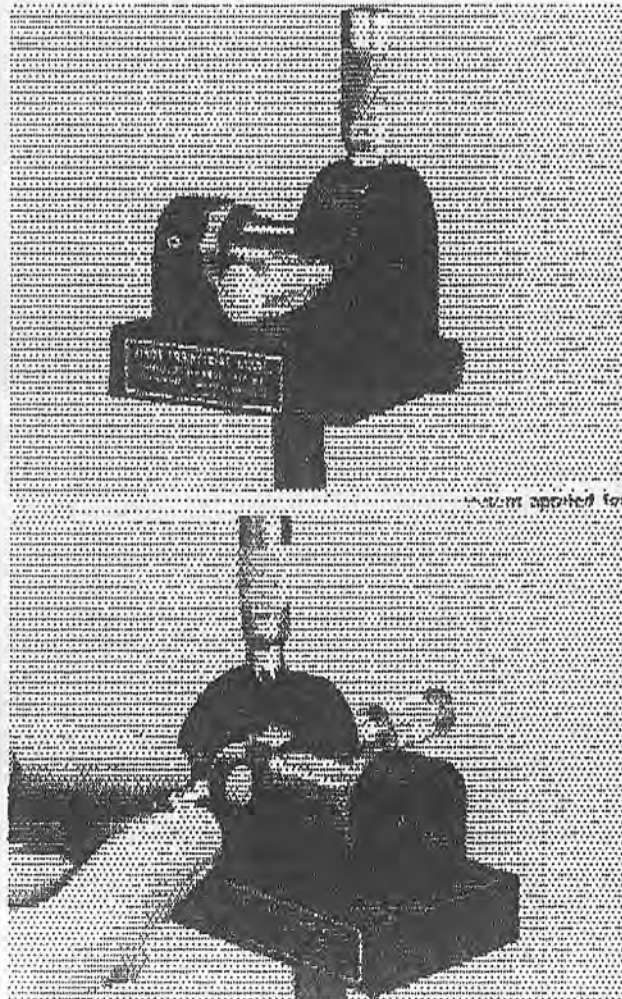


Figura E.5 : Filtro "Pin Hole" / JODON

E VI Divisor / Atenuador de Haz

Beam Splitter - Attenuator :

Espejo rotatorio de Reflexión / transmisión variable

reflexiones : 8.5 % a 85 % y
transmisiones : 0.7 % a 90 %.

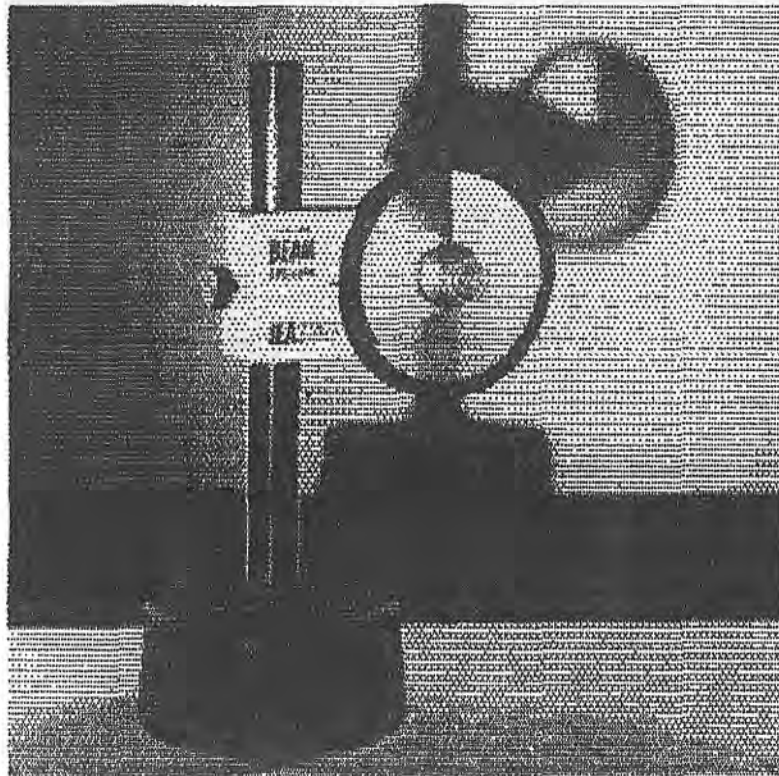


Figura E.6 : Atenuador "Beam Splitter" / JODON

E VII Portaplacas X - Y

X - Y Micropositionable Photographic Plate Holder :

Montura para placas holograficas de 10 cm x 12 cm, con grado de reproductibilidad de $\lambda/10$ de exactitud, ideal para estimaciones holograficas de interferencia en tiempo real.

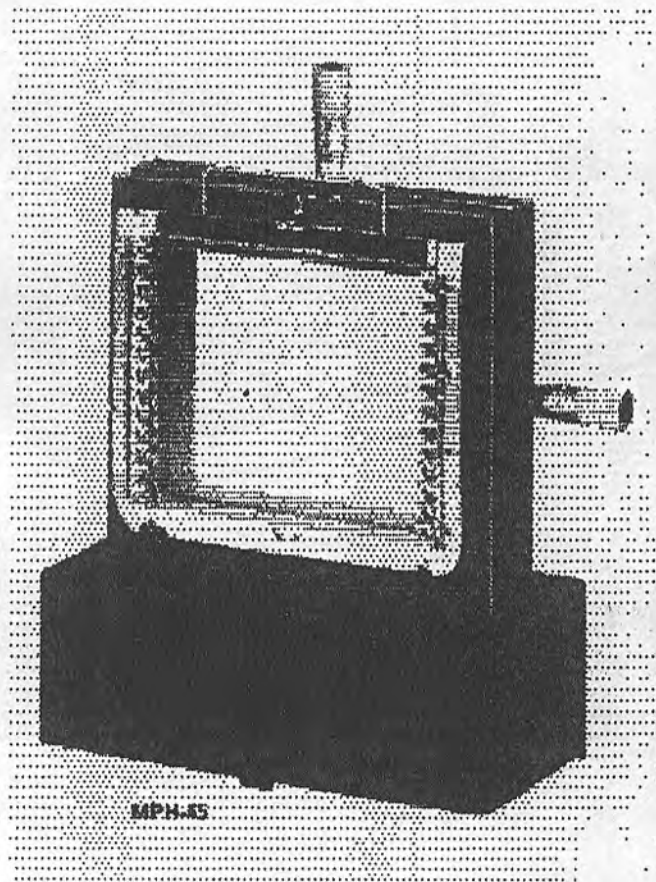


Figura E.7 : Portaplacas X - Y / JODON

E VIII Sistema de obturación electrónico

Electronic Shutter System :

El sistema permite regular las dosis de irradiancia de las placas holográficas, según el tiempo de exposición (de 1/128 a 2048 segundos) o según las dosis de energía incidentes .

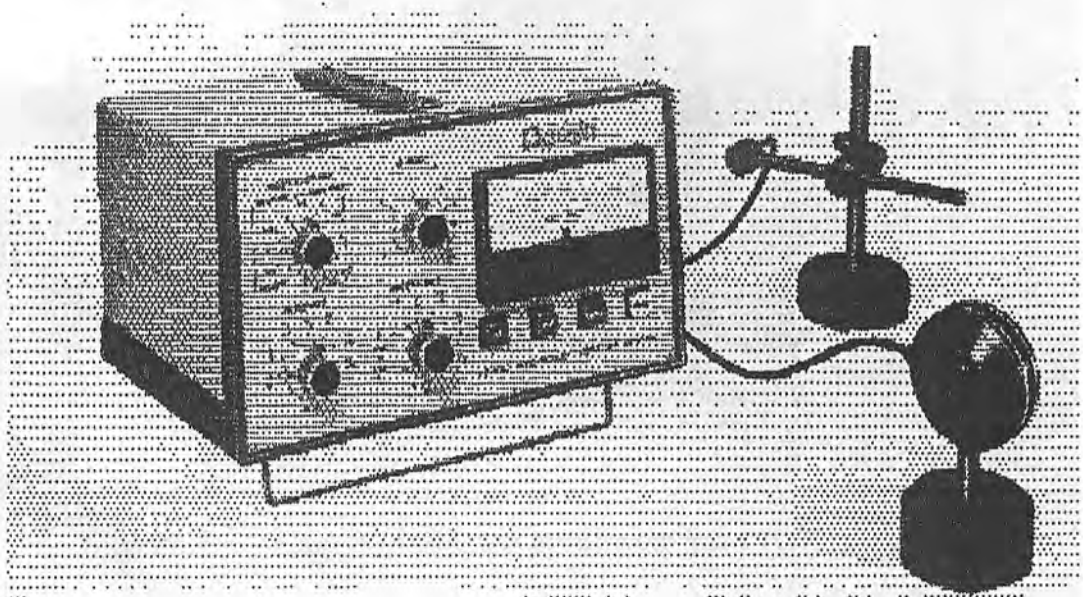


Figura E.8 : Sistema obturador electrónico / JODON

E IX Espejo de reflexión frontal

Precisión Mirror Tilter :

Espejo con superficie frontal aluminizada , acondicionada
en montura goniométrica

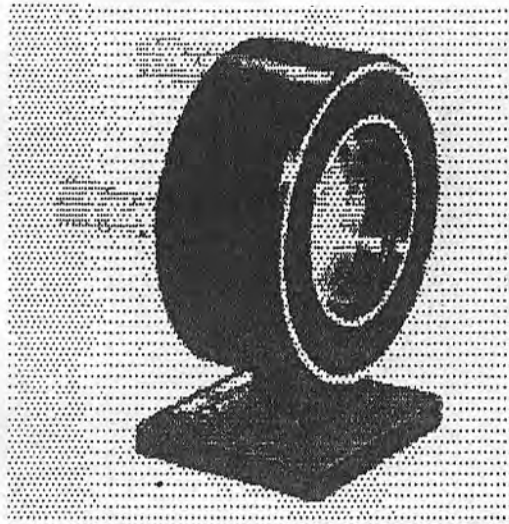


Figura E.9 : Espejo deflector goniométrico / JODON