

RESUMEN de la tesis de CLAUDIA BEATRIZ HERNANDEZ MERLO presentada como requisito parcial para obtención del grado de MAESTRIA EN CIENCIAS con especialidad en OPTICA.  
Ensenada, Baja California, México. Mayo de 1992.

HOLOGRAMAS GENERADOS POR COMPUTADORA ESCRITOS CON UN  
MICRODENSITOMETRO Y CON UN IMPRESOR LASER POSTSCRIPT

Resúmen aprobado por:



---

M.C. RICARDO VILLAGOMEZ TAMEZ  
Director de tesis.

Se presentan los fundamentos teóricos generales en que se basa la fabricación de Hologramas Generados por Computadora (HGC's), después de lo cual se expone la teoría del modelo de codificación empleado a lo largo del presente trabajo.

Para la fabricación de un holograma generado por computadora se realizó el siguiente proceso: descripción matemática del frente de onda de un objeto; cálculo de la propagación de la señal proveniente tanto del objeto como del frente de referencia, hasta el plano del holograma; cálculo del patrón de interferencia; representación gráfica del resultado de los cálculos y, por último, obtención de una reducción fotográfica de esa representación gráfica.

El trabajo fué propuesto con el fin de usar el microdensitómetro modelo micro-10, dado que sus características mecánicas y técnicas lo hacen atractivo como dispositivo de escritura y además brinda la posibilidad de reconstruir información digital directamente sobre material fotosensible.

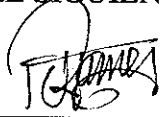
De la bibliografía recopilada se encontraron pocos trabajos de fabricación de HGC's a partir de impresores láser-PostScript de características semejantes al empleado.

El trabajo experimental se realizó básicamente en las siguientes etapas: a) interpretación del modelo de codificación seleccionado, b) generación por computadora de los objetos digitales y cómputo de los HGC's, c) estudio del lenguaje de graficado, adaptación de la información de amplitud y fase a las características del dispositivo de escritura e impresión en papel de los HGC's, d) impresión en material fotosensible de los HGC's generados, e) reconstrucción óptica de los HGC's, f) interpretación de los resultados y g) implementación de rutinas computacionales para aumento de brillantez y disminución de ruido en los patrones observados durante la reconstrucción óptica.

Tras la reconstrucción óptica de los HGC's no se observaron las imágenes holográficas esperadas, lo cual condujo a probar cada una de las etapas de fabricación de los HGC's. Como consecuencia, se detectaron errores de posicionamiento del dispositivo de escritura que se tradujeron en una representación gráfica errónea de los valores de fase calculados con la computadora.

TESIS DEFENDIDA POR: CLAUDIA BEATRIZ HERNANDEZ MERLO

Y APROBADA POR EL SIGUIENTE COMITE:



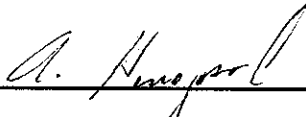
---

M.C. RICARDO VILLAGOMEZ TAMEZ.-Director del Comité



---

DRA. DIANA TENTORI SANTACRUZ.- Miembro del Comité



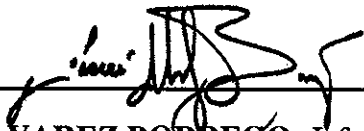
---

M.C. ALEJANDRO HINOJOSA CORONA.- Miembro del Comité



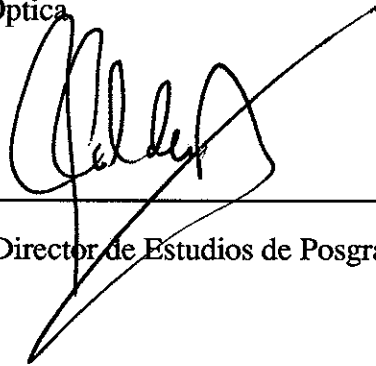
---

DR. MARTIN LUIS CELAYA BARRAGAN.- Miembro del Comité



---

M.C. JOSUE ALVAREZ BORREGO.-Jefe Depto. Optica



---

DR. LUIS EDUARDO CALDERON AGUILERA.-Director de Estudios de Posgrado

10 DE JUNIO DE 1991

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

**DIVISION DE FISICA APLICADA  
DEPARTAMENTO DE OPTICA**

**HOLOGRAMAS GENERADOS POR COMPUTADORA  
ESCRITOS CON UN MICRODENSITOMETRO  
Y CON UN IMPRESOR LASER POSTSCRIPT**

**TESIS**

que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de MAESTRIA  
EN CIENCIAS con especialidad en OPTICA presenta:

**CLAUDIA BEATRIZ HERNANDEZ MERLO**

Ensenada, Baja California, México. Mayo de 1992.

---

## **DEDICATORIA**

**A mis padres**

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco especialmente a mi asesor y director de tesis M.C. Ricardo Villagómez por su apoyo y amistad a lo largo de mis estudios de posgrado, y al Dr. Jesús Ma. Siqueiros B. por su ayuda y comentarios de mi trabajo de tesis.

A los miembros de mi comité de tesis, Dra. Diana Tentori, Dr. Martín L. Celaya B. y M.C Alcjandro Hinojosa, por haber participado como jurado de mi trabajo de tesis, por sus revisiones y comentarios.

A Patricia Alemán Díaz quien siempre me brindó su apoyo en los trabajos con el micridensitómetro.

A Carlos López Famoso por su ayuda y amistad.

A Guillermo Díaz de Cossio por su colaboración.

A Ricardo Chávez y Raúl Moreno por su apoyo en los trabajos de microfotografía.

Al personal del Departamento de Optica del CICESE, y

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por haberme dado los medios económicos con los que me fué posible realizar mis estudios de posgrado en el CICESE.

## CONTENIDO

	Página	
I	HOLOGRAMAS GENERADOS POR COMPUTADORA ESCRITOS CON UN IMPRESOR LASER POSTSCRIPT	1
I.1	Introducción	1
II	FUNDAMENTOS TEORICOS	4
II.1	Introducción	4
II.2	Hologramas de Fourier: Hologramas de Fraunhofer.	4
II.3	Problema General de la Producción de Hologramas Generados por Computadora, HGC's.	5
II.4	Descripción Básica del Proceso de Fabricación de una HGC en Base al Método de Lohmann de Codificación de Amplitud y Fase.	6
II.4.1	Selección del Formato	7
II.4.2.	Teoría de Difracción de Hologramas Binarios de Fraunhofer	10
II.4.3.	Discusiones de las Aproximaciones	13
II.4.3.1.	Implicaciones de la Primera Aproximación	14
II.4.3.2.	Implicaciones de la Segunda Aproximación	14
II.4.3.3.	Implicaciones de la Tercera Aproximación	15
II.4.3.4.	Otra Implicación de Interés	16
II.4.4.	Definición del Formato para las Celdas de Holograma	16
II.5	Consideración Sobre el Proceso de Cuantización	16
II.5.1.	Errores Producidos por Efecto de la Cuantización	17
III	EQUIPO PARA LA PRODUCCION DE HOLOGRAMAS GENERADOS POR COMPUTADORA.	18
III.1	Introducción	18
III.2	Descripción del Equipo	18
III.2.1	Equipo para el Cómputo de los HGC's	18
III.2.2	Equipo para Escritura y Grabado de HGC's	20
III.3	Dispositivos de Escritura Empleado	21
III.3.1	Características del Impresor Láser con Intérprete PostScript	21
III.3.2	Cuantización de Amplitud y de Fase Debida a la Resolución Finita de los Dispositivos de Escritura	22
III.4	Equipo para Reducción Fotográfica	22
III.5	Equipo para reconstrucción de las imágenes a partir de los HGC'S	23
III.6	Materiales Fotosensibles para Grabado de HGC's.	23

## CONTENIDO ( Continuación )

		Página
IV	DESARROLLO EXPERIMENTAL	25
IV.1	Introducción	25
IV.2	Consideraciones Previas a la Producción de los HGC's	25
IV.3	Proceso de Obtención de HGC's	26
IV.3.1	Representación en Muestras del Objeto	27
IV.3.2	Cómputo del HGC	27
IV.3.3	Obtención de Amplitud y Fase	28
IV.3.4	Codificación de la Amplitud y Fase por Medio del Impresor Láser PostCript	29
IV.3.4.1.	Cuantificación Involucrada en la Codificación	29
IV.3.5	Escritura de los HGC's con el Impresor Láser PostCript	30
IV.3.6	Reducción Fotográfica	32
IV.3.7	Reconstrucción Optica de los HGC's	33
IV.4	Patrones de Prueba y Elementos Opticos Sintéticos	34
V	RESULTADOS EXPERIMENTALES	37
V.1	Introducción	37
V.2	Generación de Objetivos Digitales y Cómputo de sus HGC's	37
V.3	Escritura de los HGC's	43
V.3.1	Impresión en Papel de la Información de Amplitud y Fase Generada con la Computadora	43
V.3.2.	Reducción Fotográfica de los HGC's Impresos en Papel	50
V.4	Reconstrucción Optica de Imágenes a Partir de los HGC's	51
V.5	Pruebas de Calidad de Escritura	53
VI	CONCLUSIONES	56
ANEXO I		60
AI	Introducción	60
AII	Equipo y Material	61
AII.1	Descripción del Microdensitómetro Modelo Micro-10	61
AII.2	Selección del Material Fotosensible	62
AIII	Codificación por medio del Microdensitómetro.	63
AIII.1	Escritura de HGC's Empleando el Microdensitómetro	63
AIII.2	Graficado por medio del Microdensitómetro	65
LITERATURA CITADA		68

## LISTA DE FIGURAS

Figura		Página
1	Una onda plana incidiendo sobre una rejilla en donde algunas rendijas no estan igualmente espaciadas produciendo un desplazamiento de fase de la onda incidente (tomado de Brown, 1966).	5
2	Arreglo para la construcción de una imagen producida por un holograma binario que es iluminado por una fuente puntual $X_0$ (tomado de Lohmann, Paris, 1974).	7
3	Escritura de la celda (m,n) en el holograma binario. La abertura rectangular tiene ancho $c\delta v$ , una altura $W_{nm}\delta v$ y está desplazada desde el centro de la celda en $(n\delta v, m\delta v)$ por $P_{nm}\delta v$ (tomado de Lohmann, 1967).	10
4	Diagrama de bloques del proceso de fabricación de HGC's.	26
5	Sistema óptico para la reconstrucción de las imágenes grabadas en los HGC's.	34
6 a)	Patrones de líneas de diferentes espesores y frecuencias espaciales como los empleados en pruebas de posicionamiento de los elementos de imagen con el impresor láser PostScript.	35
6 b)	Patrones de líneas de diferentes espesores y frecuencias espaciales como los empleados en pruebas de posicionamiento de los elementos de imagen con el impresor láser PostScript.	36
7	Uno de los objetos a partir del cual se produjeron HGC's.	38
8	a) Gráficas de las amplitudes de la Transformada de Fourier del objeto de la figura 7, b) Histograma de los valores de amplitud.	39
9	Histogramas de amplitud extendida por la técnica de ensanchamiento de histograma. a) empleando 50 niveles y b) 128 niveles de histograma.	40
10 a)	Amplitudes de la transformada de Fourier del objeto de la figura 7 después de haber sido extendida empleando a) 50 niveles de histograma y b) 128 niveles de histograma.	41
10 b)	Amplitudes de la transformada de Fourier del objeto de la figura 7 después de haber sido extendida empleando a) 50 niveles de histograma y b) 128 niveles de histograma.	42
11	HGC impreso de la letra S en donde las amplitudes se representaron como variaciones de los tonos de gris.	44
12	HGC's del conjunto de letras CICESE a) antes y b) después de eliminar líneas que en realidad no representan valores mínimos de amplitud.	45
13	HGC del conjunto de letras CICESE representado con 64 por 64 elementos de resolución.	46
14	HGC del conjunto de letras CICESE que ocupó a) el 20% del arreglo de muestras del objeto. b) HGC del mismo conjunto de letras ocupando el 10% del arreglo de muestras del objeto.	47
15	Histograma de los valores de fase del HGC de la letra E a) antes y b) después de dividir los valores de fase entre $2M\pi$	48
16	a) HGC del; conjunto de letras CICESE. b) HGC del mismo conjunto de letras, pero con la fase dividida entre $2M\pi$ . Para ambos HGC's fueron extendidos los intervalos de amplitudes significativas.	49
17	Reconstrucción óptica a partir de un HGC cuya reducción fotográfica fué de mala calidad debido a la dificultad de enfocar adecuadamente.	51



## LISTA DE FIGURAS (Continuación)

Figura		Página
18	Reconstrucción óptica a partir del HGC de un carácter E. La escala de reducción limitada de 1:46.	52
19	Reconstrucción óptica del HGC en la que la fase fué dividida entre $2M\pi$ . El HGC se produjo a partir del conjunto de letras CICESE como objeto.	52
20	Se muestra la reconstrucción óptica a partir del conjunto de letras CICESE representado en 64 por 64 elementos de resolución.	53
21	a) Franjas de Moiré a partir de dos patrones de líneas de frecuencia 0.6221 ciclos/mm. El ángulo de inclinación entre los patrones fué de $0.52236^\circ$ . b) Franjas de Moiré a partir de patrones de líneas de frecuencia 1.35 ciclos/mm, a un ángulo de inclinación de $12.25^\circ$ .	54
22	a) HGC con 80 X 80 elementos de resolución y dimensión de 3.375mm, b) Reconstrucción holográfica del objeto representado en a). [tomado como referencia de A.D. Boardman, 1980]	55
23	Microdensitómetro modelo Micro-10 empleado en la fabricación de HGC's.	61
24 a)	HGCs escritos con el microdensitómetro.	65
24 b)	HGCs escritos con el microdensitómetro.	66
25	Reconstrucción óptica del HGC escrito con el microdensitómetro, a partir del carácter E como objeto. La escala de reducción fué de 1:15.	66

## LISTA DE TABLAS

Tabla		Página
I	Valores de resolución de algunas emulsiones fotográficas comercialmente disponibles.	24
II	Valores de resolución de películas fotosensibles empleados para producir HGC's a partir del impresor PostScrip como dispositivo de escritura.	32
III	Tiempo de la computadora para calcular la Transformada de Fourier de objetos representados en arreglos con diferentes números de muestras.	37
IV	Valores de calibración análoga ( ó ganancia ) para el microdensitómetro en las películas fotosensibles empleadas para generar un perfil de grises de referencia.	62

# I HOLOGRAMAS GENERADOS POR COMPUTADORA ESCRITOS CON UN IMPRESOR LASER POSTSCRIPT

## 1.1 Introducción

Un "holograma" se produce al grabar el patrón de interferencia causado por una onda objeto y una onda de referencia. Desde su nacimiento la holografía ha evolucionado en sus modelos y técnicas y se ha diversificado ampliamente en múltiples aplicaciones, dado que representa una poderosa herramienta de captación de información al ofrecer un medio de registro de información tanto de la amplitud como de la fase del objeto bajo estudio.

El origen de la holografía generada por computadora se remonta al tiempo en que surgió el interés de generar un método alternativo al holográfico con el cual fabricar mascarillas para aplicarlas en filtraje espacial complejo y en general en procesado óptico [Brown, Lohmann, Paris (1966)]. En ese método alternativo se empleaba un graficador de puntos guiado por computadora para dibujar las mascarillas. Dado el tipo de graficadores disponibles en ese entonces, no era posible representar los elementos de imagen en variaciones graduales de transmitancia ó niveles de gris, sino que éstos hubieron de ser simuladas empleando sólo negro y blanco, de ahí que se les haya denominado "mascarillas binarias".

El principio fundamental del modelo para producir las mascarillas binarias se refiere a la forma de introducir en cada elemento de imagen que compone al holograma, la información de amplitud y fase, que son características inseparables de todo holograma. Este principio se basa en un fenómeno presentado en base a rejillas, variando su fase conocido como "phase-detour" estudiado por Leith y Upatnieks (1964) en los primeros trabajos sobre filtros espaciales acoplados y empleado como referencia por quienes se interesaron en el desarrollo de estas mascarillas binarias.

El empleo de mascarillas binarias se diversificó a medida que se utilizaron en experimentos de procesado óptico, posteriormente, en la realización de pruebas ópticas para verificar la calidad de superficies y en la generación de frentes de onda lo cual dió lugar a que surgiera toda una área de estudio y trabajo dentro del campo de la holografía: la holografía generada por computadora.

Los términos comúnmente empleados para referirse a la clase de hologramas producidos en una computadora digital son: "hologramas generados por computadora", "hologramas sintéticos" y "hologramas computacionales". De la misma forma que para hologramas convencionales, los hologramas generados por computadora pueden clasificarse como hologramas de imagen y hologramas transformada de Fourier.

La fabricación de un holograma generado por computadora se realiza mediante el siguiente proceso: descripción matemática del frente de onda de un objeto; cálculo de la propagación de la señal proveniente tanto del objeto como del frente de referencia, hasta el plano del holograma; cálculo del patrón de interferencia; representación gráfica del resultado de los cálculos y, por último, obtención de una reducción fotográfica de esa representación gráfica.

Usar como holograma una copia reducida fotográficamente de la salida gráfica de la computadora es sólo una de las muchas cosas que distinguen a los HGC's de los convencionales. Por otra parte, debido a que el frente de onda del objeto es sólo una descripción matemática transformada por la computadora, es posible que esa descripción y esa transformación no se puedan realizar con componentes ópticos en la práctica. En consecuencia, con la computadora se pueden crear elementos ópticos que no pueden ser fabricados utilizando lentes y espejos, además de que se pueden implementar matemáticamente diferentes longitudes de onda, lo cual en un laboratorio de óptica queda restringido al tipo de láser disponible.

Otra distinción entre HGC's y hologramas convencionales radica en la forma como se graba el frente de onda complejo. En los hologramas con el haz de referencia fuera de eje, como fueron desarrollados por Leith y Upatnieks (1962), la transmitancia es proporcional al cuadrado del valor absoluto de la suma de la función compleja de la onda de referencia y la función compleja de la onda objeto, en donde este valor representa la variación de intensidad del patrón de interferencia entre las dos ondas. En HGC's la transmitancia del holograma y la onda objeto no están restringidas a la relación representada por el cuadrado del valor absoluto. La mayoría del trabajo sobre HGC's ha tratado el problema de codificar el frente de onda complejo del objeto para poderlo reproducir convenientemente en dispositivos computacionales de graficado, en estos términos la "codificación" significa la conversión de una función compleja estimada a una función real, no negativa, de tal forma que la función estimada pueda ser recuperada intacta posteriormente en una reproducción de la escena.

Los HGC's dieron un giro que trascendió más allá de las aplicaciones para las que fueron concebidos ya que abrió una rama completamente nueva de estudio dentro de la óptica.

En este escrito se presentan en primer lugar los fundamentos teóricos generales en que se basa la fabricación de HGC's, después de lo cual se expone la teoría del modelo de codificación de HGC's empleado a lo largo del presente trabajo. Este modelo fue desarrollado por Brown y A. W. Lohmann (1966) y se conoce como "método de Lohmann" para la codificación de HGC's. Este método se eligió entre los diversos métodos que se han desarrollado principalmente por dos razones: la más importante radica en que se adecúa a los dispositivos de escritura disponibles y la otra radica en que fué el primer modelo que se ideó y sirvió de base para la concepción de otros desarrollados posteriormente.

El trabajo fué propuesto con el fin de usar el microdensitómetro modelo micro-10, dado que sus características mecánicas y técnicas (Anexo I) lo hacen atractivo como dispositivo de escritura y además brinda la posibilidad de reconstruir información digital directamente sobre material fotosensible. Una de las motivaciones del presente trabajo radicó en que se encontraron pocos trabajos reportando el empleo de un microdensitómetro como dispositivo de reconstrucción para HGC's [Yaroslavskii (1980)].

Sin embargo, poco tiempo después de haber iniciado el trabajo con el Micro-10, éste presentó una descompostura y fué preciso buscar otro dispositivo de escritura para la realización del trabajo. Las alternativas que se presentaron fueron un graficador de pluma "COMPLIT" y un impresor láser con intérprete de lenguaje PostScript que, de acuerdo a sus características técnicas resultó adecuado para la escritura de los HGC's.

De la bibliografía recopilada se encontraron pocos trabajos de fabricación de HGC's a partir de impresores láser-PostScript de características semejantes al empleado, lo cual proporcionó una referencia sobre las posibilidades reales de obtener HGC's con este sistema de escritura.

El trabajo experimental se realizó básicamente en las siguientes etapas: a) interpretación del modelo de codificación seleccionado, b) generación por computadora de los objetos digitales y cómputo de los HGC's, c) estudio del lenguaje de graficado, adaptación de la información de amplitud y fase a las características del dispositivo de escritura e impresión en papel de los HGC's, d) impresión en material fotosensible de los HGC's generados, e) reconstrucción óptica de los HGC's, f) interpretación de los resultados y g) implementación de rutinas computacionales para aumento de brillantez y disminución de ruido en los patrones observados durante la reconstrucción óptica.

Tras la reconstrucción óptica de los HGC's no se observaron las imágenes holográficas esperadas, lo cual condujo a probar cada una de las etapas de fabricación de los HGC's. Como consecuencia, se detectaron errores de posicionamiento del dispositivo de escritura que se tradujeron en una representación gráfica errónea de los valores de fase calculados con la computadora.

En el capítulo V correspondiente a los resultados, se presentan y discuten las consecuencias que los errores de escritura del aparato tuvieron sobre las imágenes reconstruidas a partir de los HGC's digitales.

Por último se presentan en el anexo los resultados parciales en torno al Microdensitómetro.

## **II FUNDAMENTOS TEORICOS**

### **II.1 Introducción**

En éste capítulo se presenta un planteamiento general de la teoría fundamental de la holografía generada por computadora. Posteriormente, se presentan las bases teóricas del método de Lohmann para la codificación de hologramas tomado como base para el proyecto de tesis, [Lohmann (1967)]. En base a este método, se describe el formato para el holograma, se plantea la teoría de difracción de acuerdo a ese formato y, por último, se discuten las aproximaciones introducidas.

### **II.2 Hologramas de Fourier: Hologramas de Fraunhofer**

Un holograma se obtiene al grabar la interferencia entre una onda objeto y una onda de referencia y puede grabarse en el plano imagen del objeto, en la región de difracción de Fresnel o en la región de difracción de Fraunhofer. Cuando la onda de referencia proviene de un plano que contiene al objeto, el holograma se denomina como: Holograma Transformada de Fourier. Si este plano está infinitamente alejado del holograma, se dice que el holograma es de Fraunhofer. El presente proyecto de tesis se enfocó a la generación por computadora de hologramas de Fraunhofer.

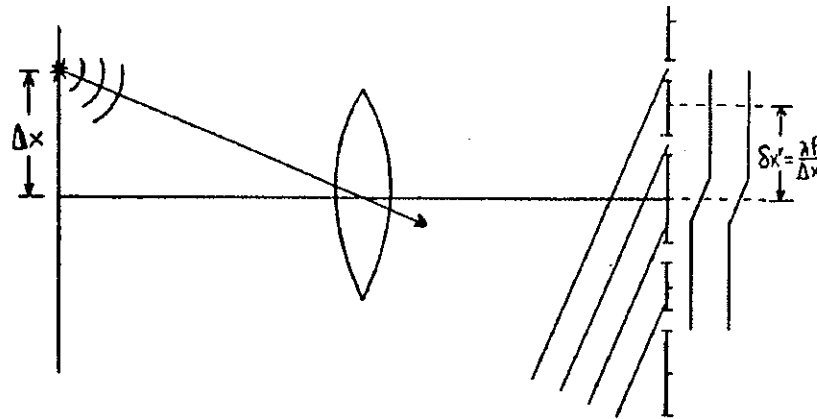
Dado que un patrón de difracción de Fraunhofer se obtiene a través de una transformada de Fourier [Born & Wolf (8.3)], los hologramas de Fraunhofer se conocen como "hologramas de Fourier". Las transformaciones de Fourier presentadas en éste capítulo se plantean por medio de la teoría de difracción de Fraunhofer.

Los hologramas de Fourier resultan interesantes por su simplicidad; puede demostrarse [Collier (3.1.3)] que para cada punto objeto se genera una rejilla de frecuencia constante sobre el plano del holograma.

Un holograma de Fraunhofer puede considerarse como una rejilla con irregularidades. Rowland y Lord Rayleigh mostraron en sus explicaciones de fantasmas de rejillas que un desplazamiento lateral de algunas rendijas dentro de la rejilla causa un corrimiento de fase. Esos corrimientos de fase ordinariamente no son deseables en rejillas espectroscópicas, pero en el caso de los hologramas, son esenciales.

El principio de este corrimiento, conocido como "phase detour", puede ilustrarse partiendo de una rejilla en la cual existe una variación de fase entre rendijas adyacentes, con separación constante, igual a  $2M\pi$ . Si se desea introducir un corrimiento en fase longitudinal de un frente de onda plano incidiendo sobre la rejilla, entonces se desplazan las rendijas longitudinalmente una cantidad equivalente al corrimiento en fase deseado. (Véase Figura 1).

De las cuatro técnicas básicas de codificación de hologramas generados por computadora; hologramas de fase "detour", hologramas de haz de referencia modificado fuera de eje, Kinoformas e Interferogramas, se eligió la técnica de hologramas de fase "detour" por ser la que se adecuó más al equipo de cómputo y a los dispositivos de escritura disponibles.



**Figura 1.** Una onda plana incidiendo sobre una rejilla en donde algunas rendijas no están igualmente espaciadas produciendo un desplazamiento de la fase de la onda incidente (tomado de Brown, 1966).

### II.3 Problema General de la Producción de Hologramas Generados por Computadora, HGC's.

La "Holografía Digital" es el análisis y síntesis de frentes de onda por medio de computadoras digitales. La síntesis de hologramas puede ser planteada de la manera siguiente:

10. existe una descripción matemática de un objeto tal que la amplitud y la fase de la luz en el objeto pueden ser encontradas para una posición arbitraria o específica de la fuente de luz,

2o. se requiere calcular la amplitud y fase de la luz esparcida por el objeto en cada punto de observación y reproducir los resultados calculados en la forma de un holograma físico, a partir del cual debe ser posible observar el objeto original desde la perspectiva deseada y con la iluminación propuesta.

Los pasos a seguir para calcular la amplitud y la fase del holograma en la computadora pueden resumirse como sigue:

- i) desarrollo de una representación discreta de las transformaciones que relacionan las distribuciones de amplitud y fase de la luz en el objeto a las correspondientes distribuciones en el plano del holograma,
- ii) desarrollo del algoritmo y programas para implementar el paso anterior,
- iii) desarrollo de una técnica para grabar hologramas sintetizados los cuales sean capaces de producir un holograma físico de la información dada por la computadora,
- iv) desarrollo de métodos de reconstrucción y observación necesarios para uso con hologramas sintetizados.

#### **II.4 Descripción Básica del Proceso de Fabricación de un HGC en Base al Método de Lohmann de Codificación de Amplitud y Fase**

Un holograma sintético se escribe con un dispositivo digital o digital-análogo, tal como una impresora, un graficador o un microdensitómetro. No se requiere que exista un objeto físicamente, es suficiente que el objeto sea descrito en términos matemáticos.

El primer paso consiste en especificar el objeto del cual se desea sintetizar el holograma, para lo cual se propone un objeto bidimensional. Dicho objeto es dividido en elementos de resolución ( Píxeles ), cada uno de los cuales representará una muestra del objeto. La resolución dependerá de las subdivisiones que se hagan del objeto, es decir, del número de muestras a tomar.

Debido a la frecuencia constante en el espaciamiento entre franjas de interferencia que presentan los hologramas de Fourier, la primera consideración que se hace es que los hologramas se generarán en el plano de frecuencias de Fourier. Para conseguirlo es necesario hacer la representación del espectro de frecuencias espaciales correspondientes al objeto seleccionado. Además, se establecen los parámetros de



la imagen que se espera obtener, esto es, el tamaño real de la imagen reconstruida considerando el factor de amplificación, la resolución de la imagen, etc. De acuerdo con lo anterior se establece el formato que debe tener el holograma, es decir, el número necesario de elementos de resolución, el tamaño del holograma, etc. Cada elemento imagen debe contener información tanto de la amplitud de transmitancia como de la fase. Para representar la fase se propone la frecuencia portadora que representará al haz de referencia.

#### II.4.1 Selección del Formato

Se desea producir una distribución de amplitud compleja  $u(x,y)$  en el plano imagen, para lo cual se ilumina un holograma  $H(v_x, v_y)$  diseñado apropiadamente con una onda plana inclinada  $\exp[i2\pi x_0 v_x]$  abreviada como  $E(x_0 v_x)$  (véase Figura 2).

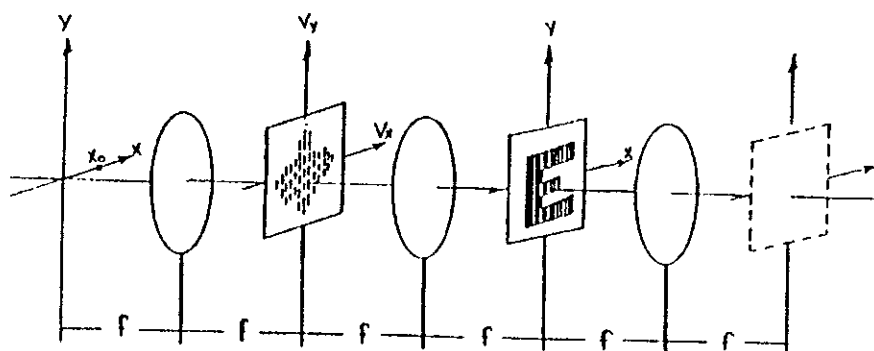


Figura 2. Arreglo para la construcción de una imagen producida por un holograma binario que es iluminado por una fuente puntual  $x_0$ . (tomado de Lohmann, Paris, 1974).

Las coordenadas reales  $x_H$  y  $y_H$  están relacionadas con las coordenadas reducidas  $v_x$  y  $v_y$  como:

$$y_H = \lambda f v_y, \quad x_H = \lambda f v_x$$

Se define una función  $h(x,y)$  que represente la amplitud difractada desde el holograma  $H(v_x, v_y)$  en la región de la imagen  $u(x,y)$ . Se requiere que  $h(x,y)$  sea proporcional a  $u(x,y)$ :

$$h(x,y) = \text{rect}(x/\Delta x) \text{rect}(y/\Delta y) \iint H(v_x, v_y) \times \\ \times E[(x+x_0)v_x + yv_y] dx dy \quad (1)$$

$$\text{rect}(z) = 1; \text{en } |z| \leq 1/2, \text{ rect}(z) = 0 \text{ en cualquier otra parte.} \quad (2)$$

$$h(x,y) = \text{cte.} u(x,y). \quad (3)$$

El tamaño finito de la imagen permite esbozar algunas conclusiones sobre el tamaño de los elementos de resolución  $(\delta v)^2$  del holograma. El número de puntos que pueden resolverse en la imagen es:

$$N^2 = (\Delta x \Delta y) / (\delta x \delta y) = (\Delta x / \delta x)^2 = (\Delta x \Delta v)^2 = SIW \quad (4)$$

donde

$$(\delta v) \leq 1 / \Delta x.$$

La ecuación (4) es el producto espacio-ancho de banda, y define el número de grados de libertad en la imagen. Debe haber al menos tantos grados de libertad en el holograma como en la imagen que será generada de éste, en otras palabras, el número de elementos de resolución en el holograma tiene que ser tan grande (o igual) al número de elementos de resolución en la imagen:

$$(\Delta v / \delta v)^2 \geq (\Delta x / \delta x)^2 = (\Delta x \Delta v)^2; \quad (5)$$

El teorema de muestreo nos da una buena razón para creer que el  $\delta v$  más grande permisible es suficientemente bueno, es decir,  $\delta v = 1 / \Delta x$ . Debido a que  $u(x,y)$  es diferente de cero sólo en un cuadrado de tamaño  $(\Delta x)^2$ , su transformada de Fourier  $\hat{u}$  puede ser escrita como:

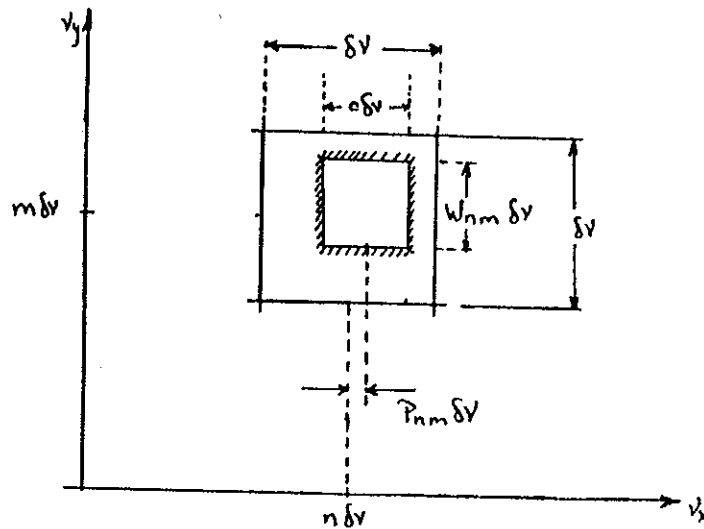
$$\begin{aligned} \hat{u}(v_x, v_y) &= \sum_n \sum_m \hat{u}(n/\Delta x, m/\Delta x) \times \\ &\times \text{sinc}(v_x \Delta x - n) \text{sinc}(v_y \Delta x - m). \end{aligned} \quad (6)$$

La función sinc como  $\text{sinc}(z) = \text{sen}(\pi z)/\pi z$ . En otras palabras,  $\hat{u}(v_x, v_y)$  está completamente especificada por un conjunto de parámetros complejos  $\hat{u}(n/\Delta x, m/\Delta x)$ , el cual representa a  $\hat{u}$  en una malla de puntos  $v_x = \frac{n}{\Delta x}$ ;  $v_y = \frac{m}{\Delta x}$ . El área de tamaño  $(1/\Delta x)^2 = (\delta v)^2$ , alrededor de cada uno de esos puntos muestra será llamada "celda".

La densidad de parámetros complejos libres es uno por celda para  $\hat{u}(v_x, v_y)$ . Por tanto se requiere al menos la misma densidad de parámetros reales en el holograma binario  $H(v_x, v_y)$ . Considerando que  $H$  sólo puede contener parámetros reales, se necesitan dos parámetros reales por celda para  $H$ , para representar la parte real y la parte imaginaria de la celda, mientras que se requiere sólo un parámetro complejo para  $\hat{u}$ . Entonces el número total de parámetros reales en  $H$  es igual a dos veces el número de celdas:  $2\left(\frac{\Delta v}{\delta v}\right)^2 = 2N^2$ .

Existe una infinidad de formas en las cuales uno puede asignar dos parámetros al tamaño, forma y posición de uno o varios puntos dentro de cada celda del holograma. Una forma común entre quienes han trabajado con hologramas binarios de hacer esa asignación es escoger un punto rectangular por celda de altura variable  $l'\delta v$ , de ancho fijo  $c\delta v$  y una posición variable  $P\delta v$  (Figura 3), en donde:

$$|v_x - (n + P_{nm})\delta v| \leq c\delta v/2; \quad |v_y - m\delta v| \leq l'_{nm}\delta v/2. \quad (7)$$



**Figura 3.** Estructura de la celda  $(n,m)$  en el holograma binario. La abertura rectangular tiene ancho  $c\delta v$ , una altura  $W_{nm}\delta v$  y está desplazada desde el centro de la celda en  $(n\delta v, m\delta v)$  por  $P_{nm}\delta v$  (tomado de Lohman, 1967).

$W_{nm}$  es la altura relativa,  $c$  es el ancho relativo del punto rectangular y  $P_{nm}$  es el corrimiento desde el centro medido con el tamaño de la celda  $\delta v$  como unidad de longitud. Esta elección particular fue hecha de acuerdo con las habilidades del graficador usado.

#### II.4.2 Teoría de Difracción de Hologramas Binarios de Fraunhofer

Como se estableció antes, una onda plana inclinada  $E(x_0, v_x)$  cae sobre el holograma binario. La amplitud binaria de transmisión  $H$  del holograma puede ser descrita por medio de la función *rect* como:

$$H(v_x, v_y) = \sum_m \sum_n \text{rect}[(v_x - (n + P_{nm})\delta v)/c\delta v] \text{rect}[(v_y - m\delta v)/W_{nm}\delta v]. \quad (8)$$

Cada producto de dos funciones *rect* cuenta por una de las aberturas rectangulares en las celdas. La amplitud compleja detrás del holograma es  $H(v_x, v_y)E(x_0, v_x)$ . Su transformada de Fourier aparece en el plano imagen como una amplitud compleja:

$$\int \int H(v_x, v_y) E[(x+x_o)v_x + yv_y] dv_x dv_y = c(\delta v)^2 \text{sinc}[c\delta v(x+x_o)] \times \\ \times \sum_n \sum_m W_{nm} \text{sinc}(yW_{nm}\delta v) E\{\delta v[(x+x_o)(n+P_{nm}) + ym]\}. \quad (9)$$

Se escogen los  $2N^2$  parámetros libres  $W_{nm}, P_{nm}$  y las dos constantes  $x_o, c$  tales que la amplitud compleja en la imagen deseada  $u(x,y)$ , dentro de la región  $|x| \leq \frac{\Delta x}{2}; |y| \leq \frac{\Delta y}{2}$  sea:

$$\text{rect}(x/\Delta x) \text{rect}(y/\Delta y) \int \int H E dv_x dv_y = h(x,y); \quad (10a)$$

$$h(x,y) = \text{cte.} u(x,y) \quad (10b)$$

Para este propósito es práctico escribir  $u(x,y)$  en una forma diferente. Introducimos los valores muestreados de  $\hat{u}(v_x, v_y)$  en la representación de Fourier  $u(x,y)$  y obtenemos:

$$u(x,y) = \int \int \hat{u}(v_x, v_y) E(xv_x + yv_y) dv_x dv_y \\ = \text{rect}(x/\Delta x) \text{rect}(y/\Delta y) \sum_{(n,m)} \hat{u}(n\delta v, m\delta v) E[\delta v(xn + ym)]. \quad (11)$$

Como se puede ver en (11),  $u(x,y)$  está representada como una serie de Fourier dentro de un área  $(\Delta x, \Delta y)$  y  $h(x,y)$ , que está definida por (10) y está representada en detalle por (9), es casi una serie de Fourier excepto por las dos funciones sinc con argumentos  $c\delta v(x+x_o)$  y  $W_{nm}$  y por el factor de fase  $E(xP_{nm}\delta v)$ . Por el momento se asume que esos tres factores son todos cercanos a la unidad de tal manera que  $h$  se representa con suficiente precisión por las series de Fourier, con lo cual podríamos entonces asegurar la igualdad de las dos series al igualar simplemente los coeficientes de Fourier uno por uno:

$$c(\delta v)^2 W_{nm} E[x_o \delta v(n+P_{nm})] \approx \text{cte.} \hat{u}(n\delta v, m\delta v): \\ \text{cte.} \hat{u}(n\delta v, m\delta v) \approx c(\delta v)^2 A_{nm} E(\phi_{nm}/2\pi) \\ W_{nm} \approx A_{nm}; \quad P_{nm} + n = \phi_{nm}/2\pi x_o \delta v. \quad (12)$$

Esto significa que la altura  $W$  y la posición  $P$  del punto en la celda  $(n,m)$  son directamente responsables de generar la amplitud  $A$  y la fase  $\phi$ , respectivamente, de la amplitud compleja  $\hat{u}$  en la celda. La igualación de los factores de fase  $E[x_o \delta v(n+P_{nm})]$  y  $E(\phi_{nm}/2\pi)$  conduce a la ecuación más simple:

$$P_{nm} \approx \phi/2M\pi, \quad (12a)$$

si  $x_0$  se escoge tal que  $x_0 \delta v$  sea un entero  $M$ .

Esta simplificación queda además justificada por la siguiente razón práctica: es deseable colocar los puntos cercanos al centro de las celdas, al menos en promedio  $\bar{P} = 0$ . Si la fase  $\phi$  tiene un promedio cero,  $\bar{\phi} = 0$ . entonces se asegura  $\bar{P} = 0$  al igualar  $x_0 \delta v = M$ :

$$E[x_0 \delta v (n + P_{nm})] = E(M P_{nm});$$

$$\phi_{nm} = 2\pi M P_{nm}; \quad (\bar{\phi}) = 2\pi M (\bar{P}). \quad (12b)$$

Lo anterior es consecuencia de la geometría propuesta, pues al limitar el tamaño del holograma y el tamaño del objeto se limita el espectro de frecuencias espaciales, y por tanto, las diferencias de fase deben ser también pequeñas.

Las ecuaciones (15) para las posiciones  $P_{nm}$  y alturas  $W_{nm}$  de los puntos rectangulares en el holograma se habían definido antes, sin embargo no se estableció que su validez es contingente sobre esas tres aproximaciones:

$$\text{sinc}[c \delta v (x + x_0)] \approx \text{cte.}, \quad \text{en } |x| \leq \Delta x / 2; \quad (13a)$$

$$\text{sinc}(y W_{nm} \delta v) \approx 1 \quad \text{en } |y| \leq \Delta x / 2; \quad (13b)$$

$$E(x P_{nm} \delta v) \approx 1 \quad \text{en } |x| \leq \Delta x / 2. \quad (13c)$$

Como se ha visto, esas aproximaciones permitieron considerar  $h(x,y)$  como una serie de Fourier la cual conduce inmediatamente a fórmulas simples para la forma de los puntos en el holograma.

### II.4.3 Discusión de las Aproximaciones

Antes de discutir las aproximaciones (16 a,b,c) es necesario entender más claramente los dos parámetros  $M = x_o/\Delta x$  y  $c$ . Físicamente  $M = x_o/\Delta x$  tiene relación con el ángulo de inclinación de la onda plana de iluminación, proveniente desde el punto  $x_o$ . Obtenemos una interrelación entre  $M$  y el ancho relativo  $c$  de punto cuando consideramos que la fase  $\phi$  tiene que ser capaz de asumir todo valor entre  $-\pi$  y  $+\pi$ :

$$|\phi| \leq \pi; \quad \phi = 2\pi MP; \quad |P| \leq \frac{1}{2M}. \quad (14)$$

Aquí  $P$  describe la posición desde el centro (véase Figura 3). Si se desea evitar que un punto se extienda más allá del borde de su celda se debe requerir que  $|P| + \frac{c}{2} \leq \frac{1}{2}$ ;  $c \leq 1 - \frac{1}{M}$ . Al asignar  $c = \frac{1}{2}$  y  $M = 1$  en los casos reales esta regla puede desobedecerse.

Para mostrar lo anterior considérese que para  $c = \frac{1}{2}$ ,  $\frac{1}{2} \leq 1 - \frac{1}{M}$ ; entonces  $M \geq 2$ ;

por tanto  $P \leq \frac{1}{4}$ , y  $P + \frac{1}{4} \leq \frac{1}{4} + \frac{1}{4} = \frac{1}{2}$ . Por otro lado si  $M = 1$ ; entonces  $c = 0$ , con lo que  $P + 0 \leq \frac{1}{2}$   $P \leq \frac{1}{2}$ .

Al asignar  $M = 1$  y  $c = \frac{1}{2}$  puede presentarse el caso de que un punto de la celda  $(n,m)$  se extienda dentro de la celda  $(n+1,m)$  y se traslape con el punto adyacente. Si se tratara con toda propiedad, esa área de traslape se implementaría como una transmitancia duplicada; sin embargo el traslape ocurre en raras ocasiones en la práctica por lo que no es preciso prestar atención a este detalle.

La razón para desobedecer la regla,  $c \leq 1 - \frac{1}{M}$ , queda justificada debido a que en los casos reales se desea obtener una imagen tan brillante como sea posible. Observando (10) y (11) para  $h(x,y)$ , se encuentra que la amplitud de la imagen será proporcional a  $\{c \text{sinc}[c \delta v(x + x_o)]\}$ . El cuadrado de este término describe la brillantez de la imagen. En el centro ( $x = 0$ ) este factor se convierte (con  $x_o \delta v = M$ ) en  $\text{sen}[(\pi c M)/(\pi M)]$ . En la medida en que el ancho relativo  $c$  del punto sea considerado, la brillantez se optimizará para  $|cM| = \frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \dots$ , arrojando un factor de brillantez  $(\frac{1}{\pi} M)^2$ ; por lo tanto, es deseable un valor  $|M| = 1$ . Sin embargo, la única elección de  $c$  es  $\frac{1}{2}$ , debido a que  $c = \frac{3}{2} > 1$  significaría un

ancho de punto mayor que el ancho de la celda. En realidad,  $c = 1/2$  es el ancho de punto más grande significativo, debido a que  $c$  y  $1 - c$  son equivalentes en términos del principio de Babinet [Born & Wolf (11.3)].

#### II.4.3.1 Implicaciones de la Primera Aproximación

La primera aproximación (13a), que resulta la más notable en los experimentos, establece que

$$\text{sinc}[c\delta v(x + x_0)] \approx \text{cte}, \text{ en } |x| \leq \frac{\Delta x}{2}$$

Eliminar esta función sinc significa que la intensidad difractada  $|h(x, y)|^2$  podría desviarse desde la intensidad deseada en la imagen  $|u(x, y)|^2$  por el cuadrado de esta función sinc. Recordando que  $x_0\delta v = \frac{x_0}{\Delta x} = M$  se obtienen como valores extremos en  $x = \pm \frac{\Delta x}{2}$  :  $\text{sinc}(cM \pm \frac{c}{2})$ . Es deseable un ancho pequeño  $c$  del punto, el cual, sin embargo podría reducir la brillantez de la imagen. Para  $cM = \frac{1}{2}$  la razón de los valores extremos se convierte en  $(1 + c)/(1 - c)$  la cual corresponde en el peor de los casos de  $c = \frac{1}{2}$  a una razón de brillantez de 9:1. Un ancho de punto de  $c = \frac{1}{2}$  y  $M = 1$  significa sólo una reducción en la brillantez de alrededor de  $1/2$  en el centro de la imagen y una razón de 2:1 de los valores extremos de la función sinc al cuadrado. La manifestación de este efecto debe poder ser observada en los experimentos, aunque cabe hacer notar que, por un lado, la función sinc varía suavemente y, por otro lado, si el objeto  $u(x, y)$  es binario (0,1) la respuesta no lineal de la placa o película fotosensible o el ojo humano puede ser ajustado para suprimir la heterogeneidad de la brillantez de la imagen, e inclusive para imágenes de tonos continuos es posible tolerar suficientemente bien un bit heterogéneo en la brillantez.

#### II.4.3.2 Implicaciones de la Segunda Aproximación

La segunda aproximación a discutir es  $\text{sinc}(yW\delta v) \approx 1$ , donde  $y$  varía dentro de  $\pm \frac{\Delta x}{2}$  y  $W$ , dentro de cero y uno. Debido a que  $\Delta x\delta x = 1$ , el argumento de la función sinc se establece dentro de  $\pm 1/2$  lo cual significa que la función sinc puede caer a 0.64. Es de esperar que no se note un decrecimiento en la calidad de la imagen, ni aún cerca de los bordes superior e inferior  $|y| = \frac{\Delta x}{2}$  en los casos experimentales en los cuales los hologramas hayan sido calculados como si  $\text{sinc}(yW\delta v) = 1$ . Esto es cualitativamente entendible debido a que la función sinc actúa como si la abertura (el holograma), cuando es observado desde el punto imagen  $y$ , tuviera un decrecimiento ligero en la transmisión de amplitud en  $(v_x = n\delta v; v_y = m\delta v)$  por un factor de  $\text{sinc}(yW_{nm}\delta v)$ . Errores en la abertura de sistemas coherentes



de formación de imágenes afectan poco a la imagen debido a que no desvían los rayos como lo harían los errores de fase. Este argumento cualitativo puede no ser una garantía contra el deterioro de la imagen. Si se desea estar seguro puede hacerse  $W$  más pequeña por ejemplo por un factor de  $2/\pi$ , con lo cual la función sinc nunca cae por debajo de 0.84. El precio a pagar por esta precaución es que la brillantez de la imagen decrecerá por un factor de  $\left(\frac{2}{\pi}\right)^2 = 0.4$ .

### II.4.3.3 Implicaciones de la Tercera Aproximación

En la tercera aproximación, (13c), se establece que:

$$E(xP_{nm}\delta v) \approx 1 \quad \text{en} \quad |x| \leq \frac{\Delta x}{2}.$$

Si se elimina este factor de fase la imagen se deteriorará como si hubiera un error de fase en la abertura en  $(v_x = n\delta v; v_y = m\delta v)$ . La cantidad de error en la fase varía con la posición  $x$  en el plano imagen. El intervalo de este error de fase  $2\pi x P \delta v$  depende del intervalo de  $x$  y de  $P_{nm}$ . El intervalo de valores para  $|x|$  es  $\frac{\Delta x}{2} = \frac{1}{2}\delta v$ . El intervalo de  $|P|$  tiene que ser suficientemente grande para que la fase  $2\pi MP$  de los coeficientes de Fourier de  $h(x,y)$  puedan variar dentro de  $\pm\pi$ . Por lo tanto  $|P|$  varía entre cero y  $1/2M$ . El intervalo de error de fase  $2\pi x P \delta v$  se extiende entre cero y  $\pi/2M$  lo cual corresponde al intervalo en camino óptico de  $\lambda/4M$  (a ser multiplicado por  $\lambda/2\pi$ ). En otras palabras, el error de fase introducido por la aproximación (13c) está dentro de los límites del criterio de Rayleigh de  $\lambda/4$  para aberraciones de onda, aún para el entero más bajo  $M=1$ . En el criterio de Rayleigh se consideran funciones que varían suavemente, representadas por polinomios de orden bajo como función de las coordenadas de la abertura. Por tanto, puede presentarse una solución más rigurosa de la ecuación fundamental (10)  $h(x,y) = cte. u(x,y)$ , la cual no se base en ninguna de estas aproximaciones (13 a,b,c).

Lohmann y Paris (1967) desarrollaron soluciones más rigurosas para la ecuación (10). La primera solución más rigurosa consiste en un método computacional iterativo del cual se genera una solución a orden cero que se aplica para generar otra de primer orden y, así, en forma sucesiva se generan soluciones de órdenes superiores.

#### II.4.3.4 Otra Implicación de Interés

Existe una situación que representa una restricción adicional en el tamaño de la imagen  $u(x,y)$  en cuya extensión se consideró que abarcaba un cuadro de tamaño  $(\Delta x)^2$ ; esa situación puede aparecer en forma natural cuando los hologramas de Fourier son usados como filtros espaciales. Asíumase ahora que:

$$u(x, y) = 0 \quad \text{sólo en } |x|, |y| \leq \xi \frac{\Delta x}{2}; \quad \xi \leq 1. \quad (15)$$

La aproximación (13a) deja ahora como valores extremos para la función  $\text{sinc}(cM \pm \xi \frac{c}{2})$ , la cual arroja como cociente de las intensidades extremas (para  $cM = 1/2$ ):  $(1 + c\xi)^2 / (1 - c\xi)^2$ . Esto es alrededor de 2:1 para  $c = 1/2$  y  $\xi = 1/3$ .

La función  $\text{sinc}(yW\delta v)$  en la aproximación (13b) no caerá más allá de  $\text{sinc}(\xi W_{\max}/2)$ , lo cual es 0.95 para  $\xi = 1/3$  y  $W_{\max} = 1$ .

También el error de fase  $|2\pi x P \delta v|$  en (13c) llega a estar muy limitado en el intervalo  $\pi\xi/2M$ . Esto corresponde a un intervalo de valores de longitud de camino óptico de  $\lambda\xi/4M$ . Para  $M = 1$  y  $\xi = 2/3$ , esto es sólo  $\lambda/12$ .

#### II.4.4 Definición del Formato para las Celdas del Holograma

Existen varias formas de escribir los hologramas, dependiendo de los dispositivos de escritura de que se disponga. De la elección del dispositivo que sea empleado depende el formato que se le dará a las celdas representando los puntos del holograma.

De los distintos formatos existentes para la escritura de los hologramas, uno muy particular consiste en definir una celda de tamaño  $(\delta x)^2$  dentro de la cual se escribe el punto imagen de ancho  $c = (\delta x)/2$  y de altura variable en función del valor de amplitud correspondiente al punto. En otro formato la altura del punto imagen se mantiene constante  $W_{nm} = \delta x$  y se varía el nivel de gris dependiendo del valor de amplitud correspondiente a ese punto.

#### II.5 Consideraciones Sobre el Proceso de Cuantización

Como ya se mencionó, el primer paso en el proceso de realización de un holograma generado por computadora es la digitalización o representación en muestras numéricas del objeto del que se desea el

holograma. Ese muestreo implica la traducción de un objeto continuo en un conjunto de lecturas numéricas tomadas a intervalos regulares, donde esas lecturas corresponden a la transmitancia del objeto sobre una transparencia.

Dado que la cuantización se considera comúnmente como la conversión de una función continua en una función discreta, el muestreo del objeto lleva implícita una cuantización de una muestra continua. Esto puede ilustrarse si se considera una de las técnicas empleadas para digitalización de imágenes, en la cual las muestras tomadas abarcan cierta área del objeto y diferentes tonos de gris; para traducir esa área en un solo valor muestreado se obtiene un promedio de los niveles de gris, cuantizándolos en un solo valor. Así, el objeto queda representado en un conjunto de valores muestreados a un número finito de niveles de cuantización. Si el proceso de muestreo se realiza a una razón suficientemente alta no implicará pérdida significativa de información de la función original. Sin embargo cuando los valores muestreados son cuantizados se añaden errores a la función original.

### **II.5.1 Errores Producidos por Efecto de la Cuantización**

Los errores debidos a la cuantización son considerados a menudo como ruido adicional. En hologramas generados por computadora el ruido de cuantización limita la precisión del frente de onda reconstruido desde el holograma y, por otro lado, reduce la detectabilidad de datos digitales o imágenes.

Un procedimiento que arroja resultados muy ilustrativos sobre los efectos de la cuantización es comparar las imágenes obtenidas a partir de hologramas de objetos especulares y difusos (objetos especulares a los que se añade fase aleatoria). En el caso de objetos especulares la distorsión de la imagen obtenida es más pronunciada. Para el caso de objetos difusos se observa un incremento en el ruido de moteado a medida que la cuantización es más severa, pero se conserva la estructura macroscópica del objeto. En el caso de objetos especulares una cuantización severa llega a producir una distorsión completa de la imagen obtenida a partir del holograma del objeto.

### **III EQUIPO PARA LA PRODUCCION DE HOLOGRAMAS GENERADOS POR COMPUTADORA**

#### **III.1 Introducción**

En el presente capítulo se resumen los aspectos más importantes para la elección y empleo del equipo requerido en la fabricación de hologramas generados por computadora. Así mismo, se presentan las características principales de los dispositivos de cómputo y de reconstrucción empleados. Por último, se mencionan las características requeridas en los materiales fotosensibles para su empleo en la producción de HGC's.

#### **III.2 Descripción del Equipo**

Existen dos etapas generales en el proceso de elaboración de hologramas generados por computadora en base a las cuales es posible hacer un análisis del equipo y de los materiales requeridos. La primera etapa consiste en la generación por computadora de la información de amplitud y fase en el plano del holograma. La segunda etapa consiste en la representación gráfica de esa información, es decir, la escritura del holograma sintético. Esta segunda etapa puede realizarse de dos formas: (i) Impresión previa del holograma sobre papel con una posterior reducción fotográfica y (ii) Escritura de información de amplitud y fase directamente sobre material fotosensible.

##### **III.2.1 Equipo para el Cómputo de los HGC's**

En principio cualquier computadora o sistema de cómputo es útil para realizar las operaciones relativas a la producción y procesamiento de la amplitud y fase correspondiente al holograma de un objeto representado en forma digital. Sin embargo, dado que se desea que la representación discreta del objeto sea lo más cercana a su continuo original, es conveniente que el sistema de cómputo sea capaz de efectuar las operaciones requeridas para el cómputo de los HGC's a partir de arreglos de datos que constituyan el mayor número de muestras posible.

En la actualidad existe equipo de cómputo cada vez más eficiente para manejar grandes cantidades de información en el menor tiempo posible.

Para el presente proyecto de tesis se dispuso del siguiente equipo de cómputo:

- Computadora PR1ME 9755,  
    memoria: 10 MBytes,  
    espacio de disco: 1.2 GBytes,  
    velocidad: 8 MIPS (millones de instrucciones por segundo),  
    dispositivos periféricos: unidad de cinta de 800 BPI,  
    1600 BPI y de 6250 BPI, impresora de línea con velocidad  
    de 900 líneas por minuto,
  
- Estación de trabajo SPARC 300,  
    memoria: 32 MBytes,  
    espacio de disco: 2560 MBytes,  
    velocidad: 16 MIPS,  
    dispositivos periféricos: Unidad de cinta de 1600 BPI  
    y de 6250 BPI,  
    impresoras: a) láser (Apple Laser Writier),
  
- Estación de trabajo SUN 3/50,  
    memoria: 4 MBytes,  
    espacio de disco: 2560 MBytes,  
    velocidad: 16 MIPS.

Este equipo de cómputo está interconectado a través de la red "ethernet" del centro de cómputo del CICESE permitiendo que exista comunicación y rápida transferencia de información entre los diferentes dispositivos de esa red.

### III.2.2 Equipo para Escritura y Grabado de HGC's

Para producir un holograma sintético es necesario transformar los arreglos de números que contienen la información de amplitud y de fase que lo describen. Para este procedimiento se requieren dispositivos especiales de grabado de hologramas que transcriban la información digital de la computadora en forma gráfica.

Existen dificultades técnicas para extraer los datos del holograma en forma simultánea desde la computadora. Los dispositivos de escritura usados para grabar las lecturas una por una en el proceso de escritura, consisten de un dispositivo para el barrido del material fotosensible y una fuente de iluminación controlada por un modulador, el modulador toma los datos de la computadora para determinar la cantidad de luz que corresponda a cada intensidad digital, que será transmitida al material fotosensible del aparato.

Los sistemas de este tipo tienen las siguientes limitantes:

- 1) No es posible grabar ambas partes de un número complejo, que corresponden a la amplitud y la fase de la luz, sobre la misma región del material fotosensible. El valor grabado debe ser no-negativo.
- 2) Los medios de grabado son no-lineales, por lo que el intervalo de trabajo útil queda limitado.
- 3) Los sistemas de grabado tienen una resolución finita. Sólo un número finito de cantidades linealmente independientes puede ser grabado sobre una unidad de área del material fotosensible.

En el presente trabajo, sin embargo, no se trabajó con resoluciones mayores a las de los materiales fotosensibles empleados, por lo que la resolución finita de éstos no constituyó un problema.

Para la elección del dispositivo de escritura es importante considerar que existen dos formas básicas de representar la información de amplitud y de fase obtenida con la computadora: la impresión en papel seguida de un proceso de reducción fotográfica y el grabado directo sobre material fotosensible (película, acetato, placa, etc.).

Para escribir la información de amplitud y fase de los HGC's sobre papel se busca emplear graficadores que proporcionen puntos o líneas finas para obtener la mayor resolución, es decir, aquellos que den la posibilidad de representar la mayor cantidad puntos por unidad de área de graficado.

En el mercado existe una gran variedad de graficadores que pueden usarse, como los graficadores de pluma, graficadores programables y diferentes tipos de impresoras ( de puntos, de alta resolución e impresoras programables con lenguajes específicos para diseño y graficado ).

Para escribir HGC's directamente sobre material fotosensible existen también distintos tipos de dispositivos: deflectores láser, deflectores de haz de electrones, microdensitómetros, graficadores digitales que pueden escribir sobre película fotosensible, etc.

### **III.3 Dispositivo de Escritura Empleado**

Al inicio del proyecto de tesis se presentaron dos alternativas para escoger el dispositivo de escritura: un graficador de pluma "Complot" y un microdensitómetro modelo Micro-10 . Fue seleccionado este último por tener mayor resolución, ser de manejo más práctico y brindar la posibilidad de escribir los HGC's directamente sobre material fotosensible.

Poco después de comienzo del trabajo experimental y en etapas posteriores, el microdensitómetro presentó fallas que lo mantuvieron fuera de funcionamiento por períodos de varios meses, por lo que no fue posible concretar el trabajo de fabricación de HGC's en torno a este aparato.

Sin embargo, los resultados parciales que se obtuvieron con el microdensitómetro (Anexo I), pueden servir de referencia en la experimentación para la fabricación de HGC's.

El dispositivo alternativo para la escritura de los HGC's fue un impresor láser con intérprete de lenguaje PostScript.

#### **III.3.1 Características del Impresor Láser con Intérprete PostScript**

El dispositivo de impresión, es un sistema que crea archivos de tipo ráster (contienen parámetros variables permitiendo cambiar las características de la imagen en cada impresión), usa luz láser, y polvo plástico de toner para producir cada página terminada de texto y gráficas. Cuando le es dada una salida de escritura, la computadora envía una descripción de la página a la impresora. Esta descripción es enviada en el lenguaje PostScript que la impresora usa para expresar el formato de una "página PostScript". La computadora interna del impresor usa comandos para crear un mapeo de la página completa, es decir, una representación punto a punto de la página. Algunos datos técnicos son los siguientes:

Modelo: Laser Writer II ( Apple Computer, Inc.),

controlador: CPU 68000 de 11.5 MHz,

capacidad de memoria: 1 MB de ROM, 2 MB de RAM,

velocidad de impresión: ocho páginas por minuto, máxima,  
niveles de gris: 256, y  
resolución de 300 líneas por pulgada.

### **III.3.2 Cuantización de Amplitud y de Fase Debida a la Resolución Finita de los Dispositivos de Escritura**

Debido a que todos los dispositivos de escritura tienen una resolución limitada no es posible representar un continuo de valores de amplitud y fase. Es preciso limitar ese continuo a un conjunto discreto de niveles de valores, donde el valor mínimo de cada nivel depende del elemento mínimo de escritura empleado por el dispositivo. Por tanto, se requiere un proceso de cuantización de los intervalos de valores de amplitud y de fase generados por la computadora para los hologramas.

Por otro lado, debido a que cada celda del holograma se representa mediante un área cuadrada, el número de niveles de amplitud y de fase que pueden representarse queda restringido al número de elementos de imagen que quedan dentro del área ocupada por la celda al ser representada en el papel.

En el caso de la impresora Láser-PostScript es posible representar el intervalo de valores de amplitud tanto en variación del tamaño del "punto" (elemento de imagen) dentro de cada celda como en variación en el tono de gris con que es impreso cada rectángulo.

### **III.4 Equipo para Reducción Fotográfica**

Las reducciones fotográficas de HGC's escritos en papel se realizaron en tres formas diferentes. A continuación se menciona el equipo empleado en cada una:

Primer sistema de reducción:	Cámara fotográfica Réflex de 135 mm.
Segundo sistema de reducción:	Cámara fotográfica SYNCHRO COMPUR GRA-FLEX, lente de 80 mm, planar 1:2.8.
Tercer sistema de reducción:	Misma cámara empleada en el segundo sistema de reducción y además máquina de reducción "REPRO MASTER 2001", Agfa-Geavert, Inc., lente de 210 mm.



### **III.5 Equipo para reconstrucción de las imágenes a partir de los HGC's:**

Láser de He-Ne de 35 mW.

Filtro espacial con objetivo de 20 X y orificio de precisión de 25 micrómetros.

Lente colimador de distancia focal: 50 cm.

Lentes transformada de Fourier de 0.70 m de distancia focal.

### **III.6 Materiales Fotosensibles para Grabado de HGC's**

Los materiales fotosensibles para el grabado de hologramas generados por computadora pueden clasificarse dependiendo del sistema de escritura que se use.

Un aspecto que es importante tener presente en la elección de material fotosensible para la escritura de los HGC's es la fuente de iluminación del sistema de escritura. El material a emplear debe ser adecuado a la longitud de onda de la fuente de iluminación.

Las emulsiones fotográficas consisten primariamente de granos extremadamente finos de haluros de plata inmersos en gelatina, en la cual están presentes además ciertos agentes sensibilizadores. La emulsión está depositada sobre un substrato transparente el cual puede ser tanto placa de vidrio como película flexible de acetato.

Las emulsiones fotográficas de haluros de plata se han empleado desde los inicios de la holografía debido a su alta sensibilidad, además de que pueden adquirirse fácilmente.

La resolución requerida de los materiales de grabado para hologramas es mucho mayor que para fotografía, donde una frecuencia de franjas de 200 ciclos/mm se considera alta. En fotografía normal una resolución de 100 ciclos/mm es adecuada, mientras que para holografía se requiere una resolución de varios miles de ciclos/mm.

Comercialmente existe una variedad amplia de materiales fotosensibles con características muy particulares dependiendo de la aplicación para la cual fueron ideados. En la Tabla I se muestran materiales que de acuerdo a su resolución son adecuados para grabado de HGC's.

**Tabla 1** Valores de resolución de algunas emulsiones fotográficas comercialmente disponibles.

Resolución (ciclos/mm)	Emulsión
800	Kodalit, Polychrome
1500	14C70, 10C75
2800	10E56, 10E70, 10E75
3000	8E56, 8E70, 8E75
superior a 2000	640F, 649GH, HRP

## **IV DESARROLLO EXPERIMENTAL**

### **IV.1 Introducción**

En el presente capítulo se describen los procesos que fueron realizados a lo largo de la práctica del método de Lohmann para la codificación y fabricación de HGC's en base al impresor láser con intérprete PostScript.

Se plantean las rutinas computacionales desarrolladas para la obtención de información de amplitud y de fase correspondiente al holograma transformada de Fourier del objeto de entrada. Se anotan, además, los procedimientos seguidos para la escritura de esa información de amplitud y de fase en función del dispositivo de escritura empleado.

### **IV.2 Consideraciones Previas a la Producción de los HGC's**

Para la realización de HGC's se requiere seleccionar el tipo de hologramas a sintetizar, el método que se empleará para codificarlos, el equipo de escritura y calcular los parámetros físicos del holograma. Después de especificado lo anterior, es posible proceder a la producción del HGC.

En la presente tesis se trabajó en la obtención de hologramas de Fourier generados por computadora, para lo cual se dispuso de las rutinas computacionales de la transformada rápida de Fourier, "FFT" (Fast Fourier Transform).

El proceso de llevar a la práctica un modelo de codificación de información de amplitud y fase queda sujeto fuertemente a las características y limitaciones del equipo de escritura que se usará; incluso se han llegado a diseñar técnicas de codificación en base al dispositivo de escritura, como es el caso de la codificación por retraso de fase durante el proceso de muestreo. Se han desarrollado además diferentes versiones de esos métodos de codificación, con el objeto de hacerlas más simples y de reducir el número de datos a manejar en la computadora.

Antes de proceder a la generación por computadora de los hologramas es preciso tomar en cuenta la longitud de onda de la fuente de reconstrucción, la longitud focal de la lente a emplear en la reconstrucción, el número de muestras del objeto y la resolución del dispositivo de escritura para determinar el tamaño de la imagen después de la reconstrucción óptica, el tamaño del objeto y el tamaño del holograma después de la reducción.

Para la definición de los parámetros anteriores se consideró una fuente de luz de longitud de onda de 632.8 nm, una lente Transformada de Fourier de 70.0 cm y 128 x 128 muestras objeto. Como ejemplo, en el caso del impresor láser y tomando la escala máxima de reducción fotográfica de 1:135 se tiene que el tamaño teórico tanto del objeto  $(\Delta x_o)^2$  como de la imagen reconstruida es de  $(37.6987\text{mm})^2$  y el ancho del holograma después de la reducción  $(\Delta x_H)^2 = (\lambda f \Delta v)^2$  es de  $(1.504 \text{ mm})^2$ .

### IV.3 Proceso de Obtención de HGC's

El proceso de elaboración de HGC's se realiza a través de la secuencia ilustrada en la Figura 4.

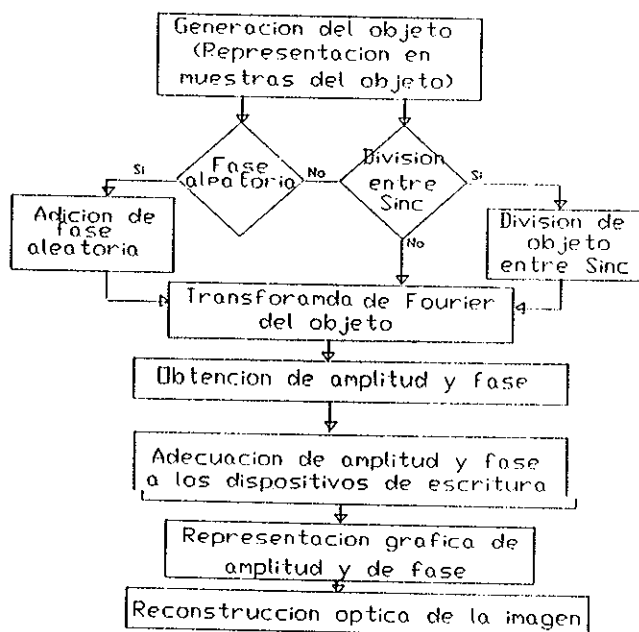


Figura 4. Diagrama de bloques del proceso de fabricación de HGC's.

### IV.3.1 Representación en Muestras del Objeto.

Existen varias formas de generar imágenes digitalizadas que sirvan de objeto para obtener el holograma. Para el presente trabajo se presentaron dos opciones para la generación de muestras digitales del objeto. La primera consistió en la digitalización de la imagen impresa sobre película fotográfica a través del empleo del microdensitómetro. La segunda consistió en generar el objeto a través de programas computacionales, después de cuyas ejecuciones se generaron los arreglos matriciales conteniendo las muestras digitales del objeto.

En los hologramas de Fourier, los objetos no difusos tienden a crear un pico muy fuerte en el centro del holograma. Este pico puede ser miles de veces más fuerte que sus alrededores, lo cual causa un problema debido al intervalo dinámico limitado del material de grabado fotográfico. Si el proceso fotográfico se realiza de manera tal que el pico es grabado apropiadamente, entonces el medio ambiente se pierde debido a que su exposición no sobrepasa el umbral del material fotosensible. En ese caso la imagen que puede obtenerse en la reconstrucción no será definida debido a que las frecuencias espaciales altas se pierden. Una solución es subexponer el pico, sin embargo las frecuencias bajas se ven afectadas y la imagen tendrá bordes definidos, pero las partes internas se perderán parcialmente.

Una forma de obtener una distribución más uniforme de amplitudes de Fourier es multiplicar las amplitudes del objeto por un factor aleatorio de fase. Suponiendo que el objeto de amplitud  $A(x,y)$  es multiplicado arbitrariamente por el factor de fase  $\exp(-iax-iby)$ , su transformada de Fourier se corre a  $F(X-a,Y-b)$ . La introducción de éste factor de fase en la función  $A(x,y)$  no introduce ninguna diferencia en la imagen observada durante la reconstrucción dado que lo que se observa es  $|A(x,y)|^2$  y equivale a usar un difusor en un arreglo óptico dispuesto para la generación de un holograma de Fourier.

### IV.3.2 Cómputo del HGC.

El HGC del objeto se obtiene a partir de su espectro de Fourier, es por tanto que se emplea el algoritmo de la Transformada de Fourier para generar el espectro complejo del objeto en la computadora.

La rutina empleada se basa en el algoritmo matemático FFT (Fast Fourier Transform) de la Transformada Rápida de Fourier, desarrollado por Cooley y Tukey [1965] para reducir el número de operaciones y, por tanto, el tiempo de cómputo requerido para la transformación de Fourier.

#### IV.3.3 Obtención de Amplitud y Fase.

A partir de los datos complejos obtenidos de la transformación de Fourier se obtienen los valores de amplitud y de fase que corresponden al holograma del objeto. La amplitud, correspondiente al holograma, se obtiene como el módulo de los valores complejos de transformada de Fourier del objeto, la fase se obtiene como la tangente del cociente de la parte imaginaria entre la parte real de los valores complejos de la transformada de Fourier.

En los hologramas producidos a partir de caracteres como objetos es común observar que casi la totalidad de las amplitudes se distribuyan en el intervalo de valores bajos, por lo que es preciso efectuar un procedimiento de realce de amplitudes. El realce de amplitudes equivale a ampliar el tamaño de algunas aberturas en el holograma escrito sobre material fotosensible y tiene como consecuencia que el campo producido en el plano imagen al iluminar el holograma durante la reconstrucción sea más brillante.

Las amplitudes originales se extienden en el intervalo de intensidades digitales de 0 a 1 representando blancos y negros respectivamente y el número de niveles empleados para generar los histogramas entre 50 y 128. Considerando para un ejemplo 128 niveles en el histograma y suponiendo que para el momento en que es alcanzado el nivel  $n_L$ , se cuenta el 99% de las amplitudes, entonces se forma un factor de  $128/n_L$  y todas las amplitudes originales son convertidas a  $A' = (128/n_L)A$ . Este procedimiento ensancha la escala de amplitudes de modo que  $A = A_L$ , en  $n_L$ , igual a la unidad, sin embargo permite que un número reducido de amplitudes sean mayores a la unidad, lo cual no representa un problema pues durante la escritura del holograma son implementadas como si tuvieran un valor igual a la unidad.

#### **IV.3.4 Codificación de la Amplitud y Fase por Medio del Impresor Láser PostScript**

Para el caso del impresor láser-PostScript las variaciones de amplitud del holograma fueron representadas gráficamente de dos maneras, tanto en variación del tamaño del rectángulo dentro de la celda como a través de rectángulos de tamaño constante variando en tonos de gris.

Se determinó el ancho mínimo del elemento de imagen que es posible obtener considerando la resolución de 300 líneas por pulgada. Una vez hecho esto, se delimita el número en que quedarán divididos los intervalos de valores para la amplitud y la fase.

##### **IV.3.4.1 Cuantización Involucrada en la Codificación**

La representación de amplitud y de fase en intervalos discretos de valores implica un proceso de cuantización, que está sujeto al número de muestras con que se representa el objeto. Es necesario definir con claridad la resolución del dispositivo de escritura para determinar la cantidad de cuantización introducida.

A partir del espacio de graficado disponible y del número de elementos de resolución con que se representa el holograma se determina el área que ocupará cada celda dentro del espacio de graficado. De acuerdo con la cantidad de puntos por unidad de longitud que puede representar el dispositivo de escritura, se calcula el número de puntos que quedan comprendidos dentro de cada celda. Este número representa las posiciones que pueden ser tomadas para la representación de las variaciones de amplitud y de fase, es decir, representa los niveles de cuantización. La representación de las variaciones de amplitud como diferentes tonos de gris depende del número de puntos por unidad de área que requiere el dispositivo de escritura para la codificación de los grises. Si el número de puntos comprendido en el rectángulo dentro de la celda es mayor al mínimo requerido para la codificación de todos los grises entonces el número de niveles de gris que puede graficar el dispositivo determina el número de niveles de cuantización de amplitud.

#### IV.3.5 Escritura de los HGC's con el Impresor Láser PostScript

La representación gráfica de los valores de amplitud y de fase queda sujeta a las características del dispositivo de escritura. A partir de sus características y capacidades surgen las formas alternativas para la representación de los parámetros complejos del HGC, es decir, las variaciones de amplitud y de fase.

La información correspondiente a los HGC's debe ajustarse a los requerimientos de formato y resolución tanto del impresor como del lenguaje PostScript; después de esto, fueron generados los programas en cuya ejecución se interpreta la información de amplitud y de fase para producir la gráfica sobre papel de los HGC's.

La adaptación de la información de amplitud y fase a las capacidades de resolución de los diferentes dispositivos requirió la generación de rutinas computacionales diferentes para cada dispositivo. Así, para el caso del impresor láser empleado, la programación para el graficado de los hologramas se desarrolló en lenguaje Fortran 77 y en lenguaje PostScript.

Con el objeto de ilustrar más claramente el proceso de escritura de hologramas generados por computadora con el impresor láser PostScript a continuación se menciona la secuencia de rutinas computacionales requeridas para efectuar este proceso.

- a) Ajuste de la información de amplitud al intervalo de 0.00 a 1.00, de acuerdo al intervalo de valores que puede tomar el impresión láser para graficar.
- b) Obtener los complementos a 1 del intervalo de valores de amplitud para adecuarlos al formato que el lenguaje PostScript toma para representar los 256 niveles de gris.



- c) Cuantización de valores de fase, la cual consiste en la división del intervalo valores de fase del holograma en un número de niveles acorde a la resolución del dispositivo en particular empleado.
- d) Generación de programa en PostScript para el graficado de los HGC's a partir de los valores de amplitud y de fase.
- e) Graficado recursivo de los parámetros complejos tras la ejecución de los programas generados en lenguaje PostScript.
- f) Generación en papel de los HGC's tras la ejecución de los programas en PostScript.

En el proceso de graficado se toman uno a uno los valores de amplitud y fase y se localizan las coordenadas en el área de graficado correspondientes a cada celda de holograma. Celda por celda, el programa hace el corrimiento relativo a la fase y dibuja el rectángulo del tamaño o tono de gris equivalente al valor específico de amplitud. Una vez considerados todos los valores de amplitud y de fase, el patrón generado tras la ejecución del programa en PostScript es enviado al impresor láser, interpretado por éste y posteriormente impreso en una hoja de tamaño estándar "carta" 8.5 x 11 [pulgadas]<sup>2</sup>.

Los HGC's impresos consisten de un conjunto de  $N$  rectángulos, en donde  $N$  es el número de elementos de resolución. Por un lado, los rectángulos pueden ser de diferentes tamaños y por otro, de diferentes tonos de gris al representar los distintos valores de amplitud. En ambos casos cada rectángulo está corrido respecto al centro de la celda del holograma una cantidad proporcional al corrimiento en fase de cada elemento de imagen.

#### IV.3.6 Reducción Fotográfica

El paso siguiente a la impresión en papel de HGC's es un proceso fotográfico para reducir las dimensiones del holograma impreso, con el objeto de que al ser iluminado con luz de la longitud de onda con que se diseñó pueda formarse la imagen deseada. El proceso de reducción fotográfica no resulta ser tan simple como puede parecer si no se cuenta con equipo apropiado; los detalles técnicos pueden complicarlo e introducir aberraciones en los hologramas reducidos.

Para elegir los materiales fotosensibles más apropiados para el proceso de reducción de los HGC's se realizaron pruebas con diferentes materiales. Se generó un perfil de grises empleando la computadora. Se reconstruyó dicho perfil con el microdensitómetro empleando tipos distintos de películas fotosensibles para observar la respuesta de cada una a diferentes intensidades de sensibilización.

En la Tabla V del Anexo I se muestran los valores de calibración análoga (o ganancia) para el microdensitómetro usados en la sensibilización de las películas en el proceso de reconstrucción.

En las reducciones fotográficas de los HGC's impresos en papel, los materiales fotosensibles utilizados estuvieron acorde a los sistemas de reducción; dichos materiales fueron Kodalit y Polychrome, ambos de resolución 800 líneas/mm. En la Tabla II se muestran los valores de resolución y contraste de los materiales empleados en el presente trabajo.

**Tabla II** Valores de resolución de películas fotosensibles empleados para producir HGC's a partir del impresor láser PostScript como dispositivo de escritura.

Películas Fotográficas	Contraste	Resolución (ciclos/mm)
Technical Pan Film	Alto	(1500,2000)
Tmax asa 400	Suave	150
Kodalit	Alto	800
Polychrome	Alto	800

La forma en que un impresor láser simula los diferentes niveles de gris es a través de distribuir diferentes cantidades de puntos en una misma área, de tal forma que desde lejos los puntos individuales son difícilmente apreciables. En la práctica fue posible emplear materiales de alto contraste en la reducción

fotográfica de HGC's cuyas amplitudes se representan como variaciones en tonos de gris; se observaron buenos resultados del empleo de las películas Kodalut y Polychrome en la reducción de HGC's cuya amplitud se representó como variación del nivel de gris.

El equipo empleado para las reducciones fotográficas se describe en el capítulo III. En el primer sistema los HGC's se adhirieron a una pared plana y fueron fotografiados colocando la cámara a varios metros de distancia. Las películas fotográficas empleadas fueron "Technical Pan Film" y "Plus X Pan" ASA 125. Debido a que con este sistema no se obtuvieron buenos reducciones se empleó un segundo sistema.

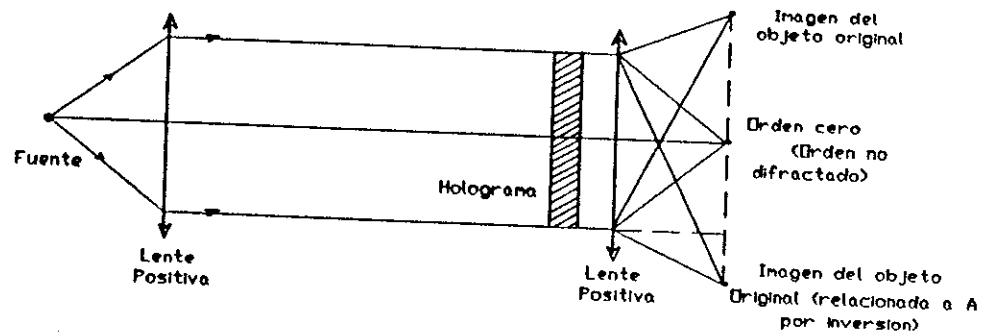
El segundo sistema consistió de una cámara fotográfica (descrita en el capítulo anterior) la cual capta al HGC adherido a una pantalla luminosa. Los HGC's a reducir deben estar impresos sobre acetato o sobre película transparente. Para aislar al sistema de ruido óptico es necesario cubrir el resto de la pantalla con cartulina negra. La cámara fotográfica empleada se colocó a 6 mts. de distancia. La máxima cantidad de reducción que fue posible alcanzar con este sistema es de 65X.

De acuerdo a lo sugerido en diversos artículos [Lohmann, Paris (1967), Lee (1970)] son desables escalas de reducción superiores a 100X, por lo que se optó por realizar la reducción fotográfica en dos pasos. En el primer paso se reduce el holograma a la mitad de sus dimensiones. En el segundo paso los hologramas deben reducirse a 65X, lo cual en teoría permite una reducción total de 135 X. El material fotosensible empleado fue Polycrome.

#### IV.3.7 Reconstrucción Óptica de los HGC's

La reconstrucción se lleva a cabo mediante un sistema óptico basado en los parámetros que intervinieron en la producción del HGC tales como la longitud de onda de reconstrucción y la distancia focal de las lentes transformada de Fourier.

Para el proceso de reconstrucción se utiliza el arreglo mostrado en la Figura 5. La luz proveniente de un láser de He-Ne de longitud de onda 632.8 nm se filtró empleando un objetivo de 10X y un orificio de precisión de  $25 \mu m$ . El holograma fue iluminado con un frente de onda plano. A una distancia de 0.70m se colocó la lente transformada de Fourier. Las observaciones se realizaron en el plano de la transformada de Fourier.



**Figura 5.** Sistema óptico para la reconstrucción de las imágenes grabadas en los HGC's.

Las reconstrucciones generalmente son pequeñas de manera que resulta más sencillo observar las imágenes sobre una pantalla en el plano lejano, a algunos metros de distancia. Puede emplearse el positivo o el negativo de un HGC reducido fotográficamente. Los resultados obtenidos de las reconstrucciones se reportan en el siguiente capítulo.

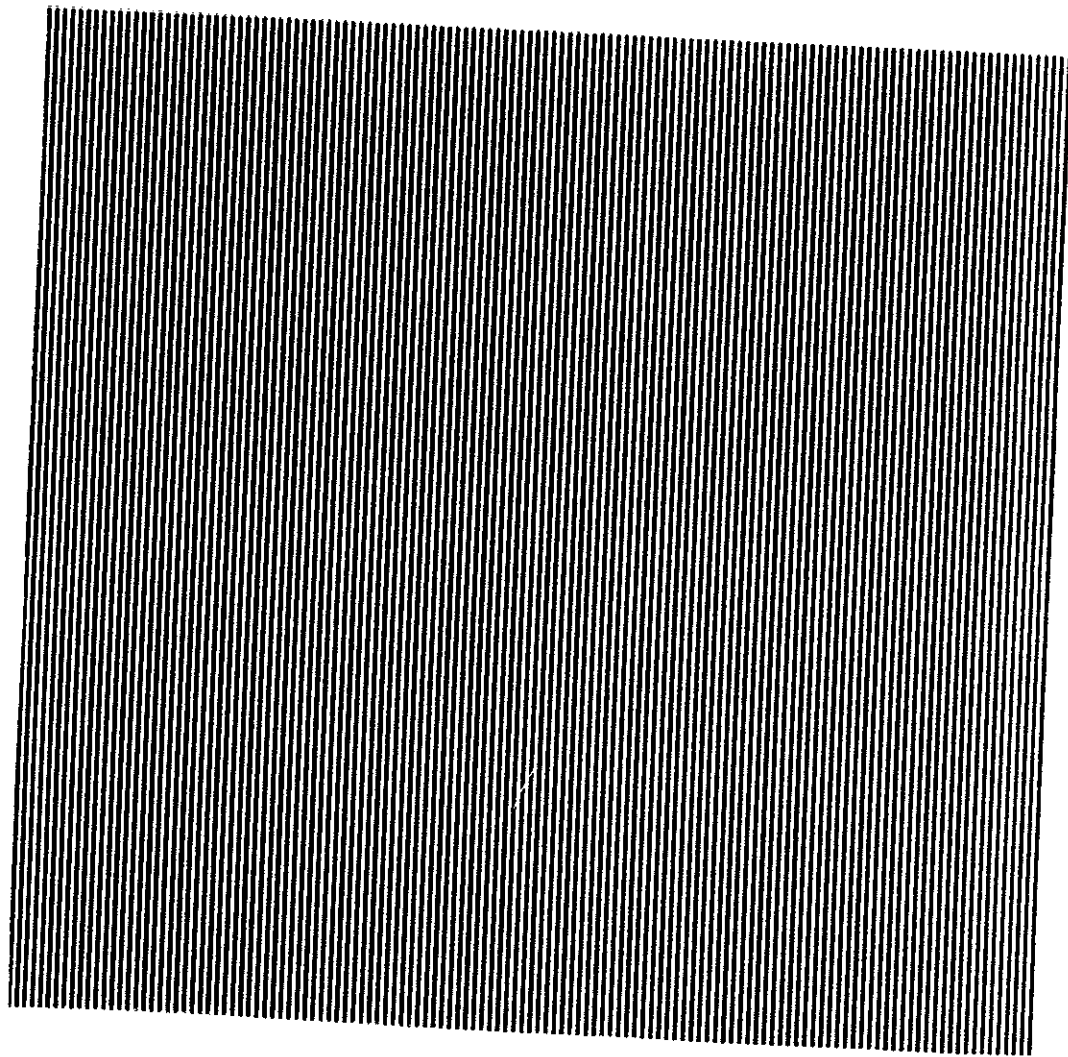
#### IV.4 Patrones de Prueba y Elementos Ópticos Sintéticos

Si el dispositivo de escritura presenta errores de posicionamiento para cada elemento de la imagen, o si el ancho teórico de estos elementos de imagen no concuerda con el ancho real, entonces es preciso encontrar la resolución real en posicionamiento y en dimensión de los elementos que presenta el dispositivo. La determinación de la resolución real puede hacerse a través del análisis de patrones de prueba impresos.

Para determinar la calidad de escritura del impresor láser PostScript se generaron patrones de prueba que consistieron de rejillas de diferentes frecuencias espaciales y de líneas de distintos espesores, como se muestra en la Figura 6.

Se analizó, por medio de la observación de patrones geométricos de moiré, la existencia de variaciones de posición de las rejillas en patrones impresos. Para este análisis se imprimieron dos patrones de líneas rectas del mismo archivo de datos con el mismo dispositivo de escritura y se colocaron sobre una superficie plana; se introdujo una pequeña inclinación de uno de los patrones respecto al otro para producir

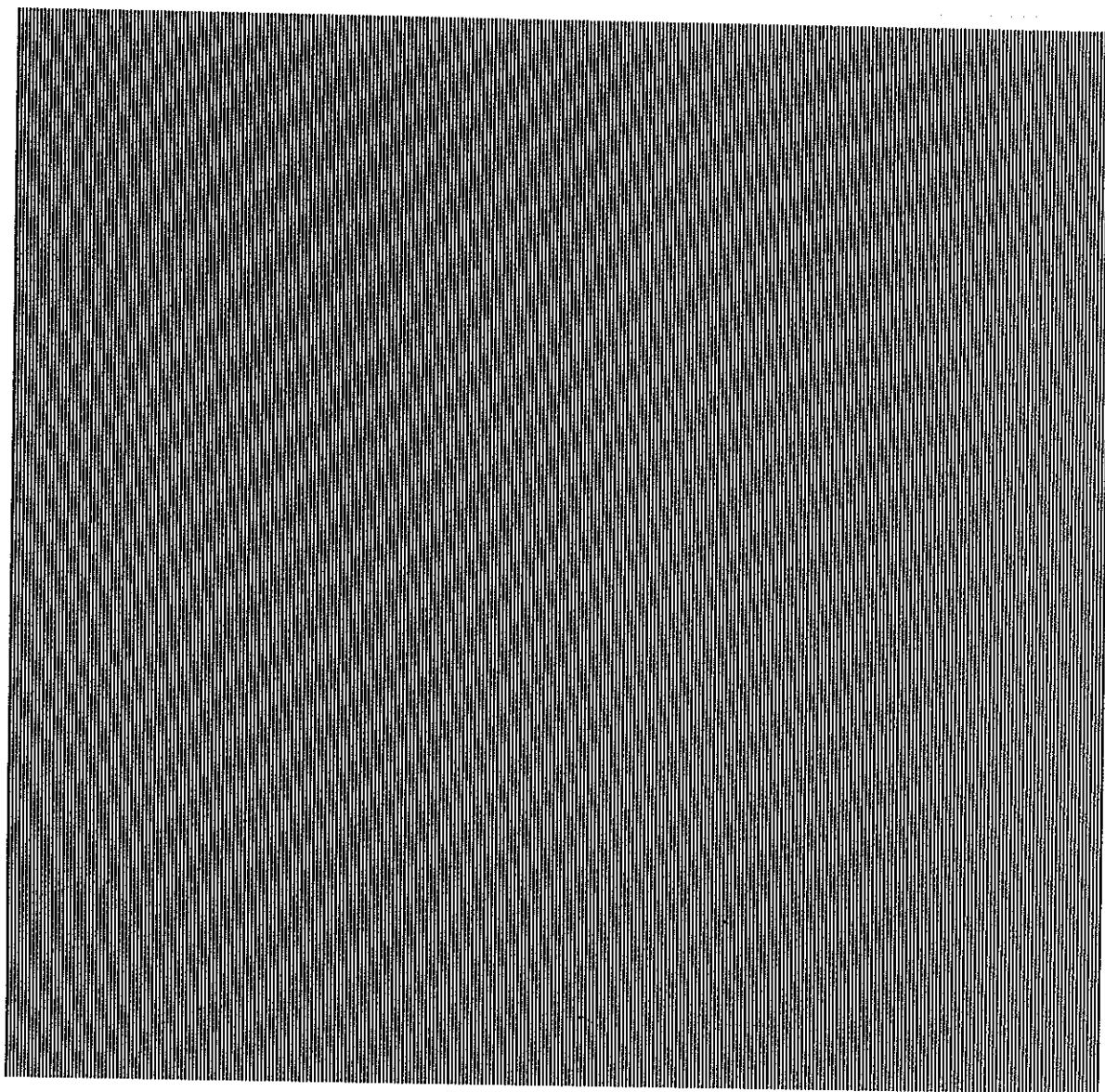
intersecciones de las líneas de los patrones de prueba; como resultado de las intersecciones se observaron las "frangas de moiré" [Vargady, (1964)]. El patrón de franjas de moiré es un conjunto de líneas rectas cuando los patrones de prueba son idénticos; cualquier distorsión de estas franjas es producto de desplazamientos de los puntos homólogos en las líneas que forman los patrones de prueba; estos desplazamientos son producto de errores de escritura introducidos por el impresor. En el siguiente capítulo se describen los resultados de las pruebas de posicionamiento realizadas, Figura 21.



a)

**Figura 6.**

Patrones de líneas de diferentes espesores y frecuencias espaciales como los empleados en pruebas de posicionamiento de los elementos de imagen con el impresor láser PostScript.



b)

**Figura 6.** Patrones de líneas de diferentes espesores y frecuencias espaciales como los empleados en pruebas de posicionamiento de los elementos de imagen con el impresor láser PostScript.

## V RESULTADOS EXPERIMENTALES

### V.1 Introducción

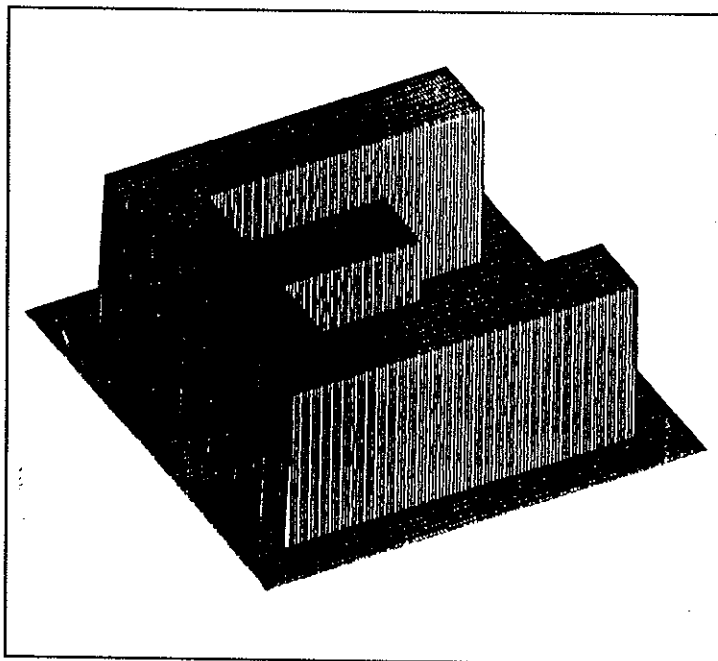
En este capítulo se muestran y comentan los resultados obtenidos en cada uno de los pasos del proceso de fabricación de HGC's, empleando un impresor láser PostScript. Se discuten los aspectos más relevantes de cada uno de esos pasos, mencionando los detalles más determinantes para los resultados. Se ilustran por medio de tablas y gráficas los efectos de los procedimientos de mejoramiento de las imágenes y por último se dan recomendaciones y sugerencias para el mejoramiento de los resultados obtenidos.

### V.2 Generación de Objetos Digitales y Cómputo de sus HGC's.

Como se mencionó con anterioridad, el primer paso en la producción de un HGC consiste en generar una representación en muestras del objeto para procesarlo en la computadora. En el caso del presente trabajo los arreglos digitales de los objetos se generaron directamente a través de un programa computacional. Los objetos fueron representados con diferentes números de muestras con el fin de tener una idea de la eficiencia de la computadora en el cómputo de la transformada de Fourier (véase la Tabla III) y con el fin de comparar las imágenes obtenidas a partir de sus respectivos HGC's.

Tabla III Tiempo de la computadora para calcular la Transformada de Fourier de objetos representados en arreglos con diferentes números de muestras.

Número de elementos de resolución	Espacio de memoria en bytes	Tiempo de cómputo de la transformada de Fourier
512 x 512	1 073 529	9.6 seg
256 x 256	252 928	6.4 seg
128 x 128	108 916	2.4 seg
64 x 64	26 624	0.8 seg



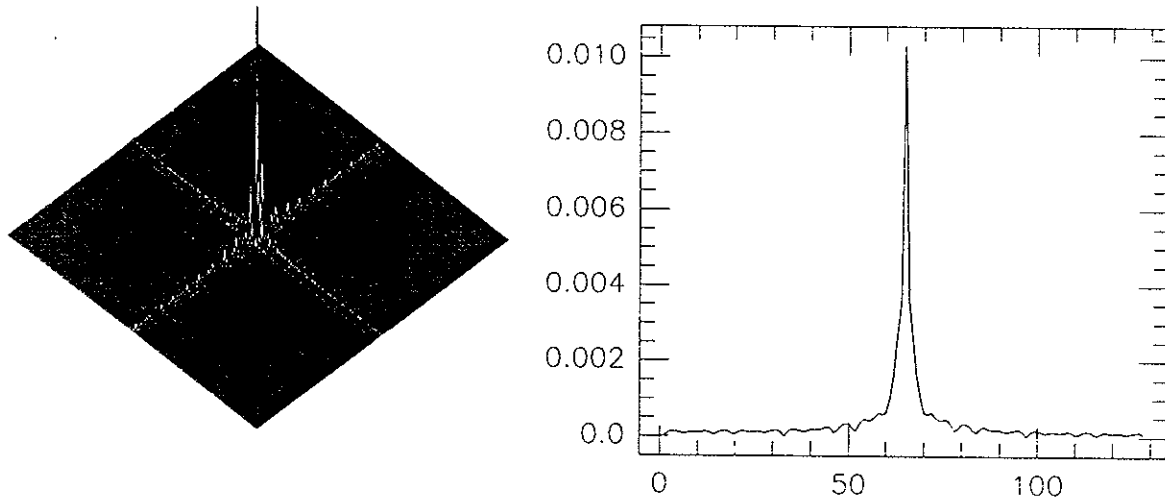
**Figura 7.** Uno de los objetos a partir del cual se produjeron HGC's.

La reducción en el número de muestras tomado para representar el objeto produce una disminución en la resolución de los hologramas, sin embargo, una consecuente ventaja es la reducción en el tiempo de procesamiento computacional a través de la secuencia de programas requeridos para producir los HGC's. Esa disminución de tiempo de procesamiento es muy valiosa cuando se considera que la cantidad de programas computacionales que deben ejecutarse.

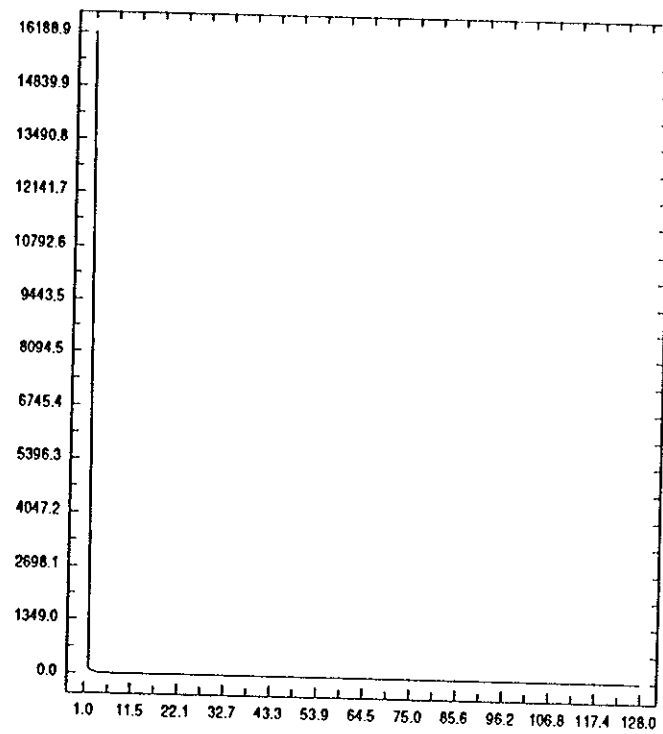
Para tener una idea del comportamiento de los valores de amplitud y de fase producidos de las transformadas directas de Fourier se generaron histogramas de la amplitud y de la fase.

Como puede observarse de las Figuras 8.a y 8.b existe un intervalo reducido de valores significativos de amplitud. Con el objeto de ensanchar este intervalo se llevaron a cabo procedimientos de amplificación de valores por ensanchamiento de histograma, considerando histogramas de 50 y de 128 niveles, Figura 9. Ampliar el tamaño de algunas aberturas tiene como consecuencia un aumento en la brillantez del campo producido en el plano imagen al iluminar el holograma durante la reconstrucción. En la Figura 10 se muestran las gráficas la amplitud de un HGC antes y después de haber sido extendidas por la técnica de ensanchamiento de histograma.





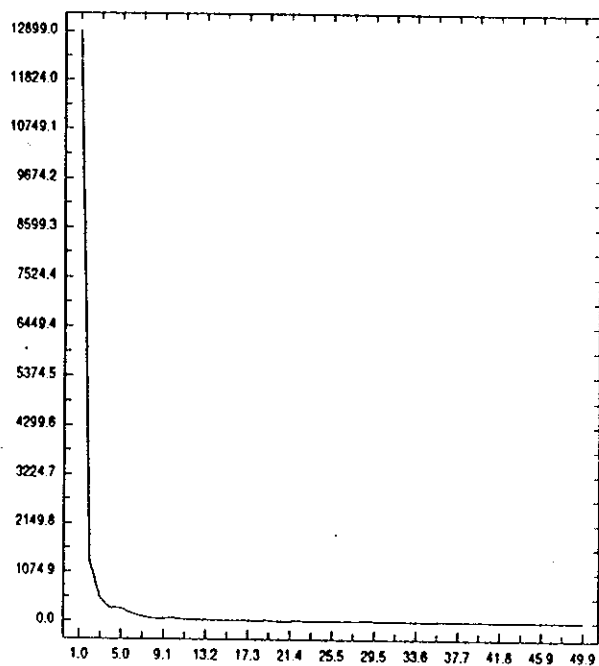
a)



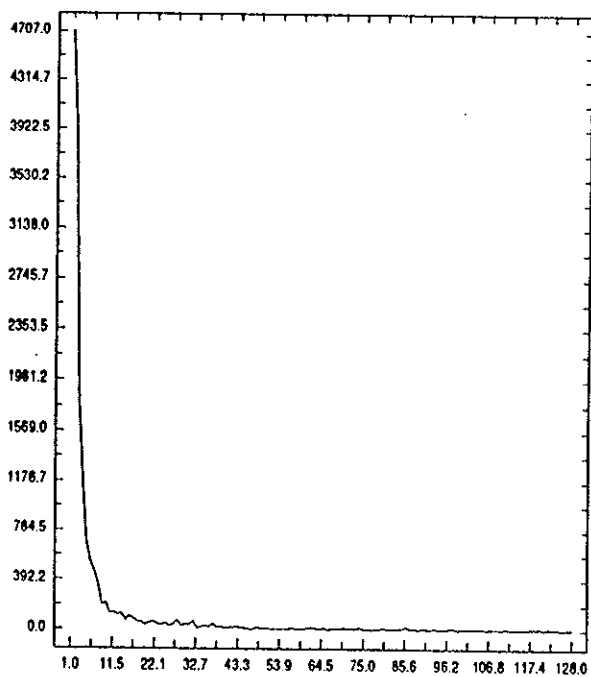
b)

Figura 8.

a) Gráficas de las amplitudes de la Transformada de Fourier del objeto de la Figura 7,  
 b) histograma de los valores de amplitud.



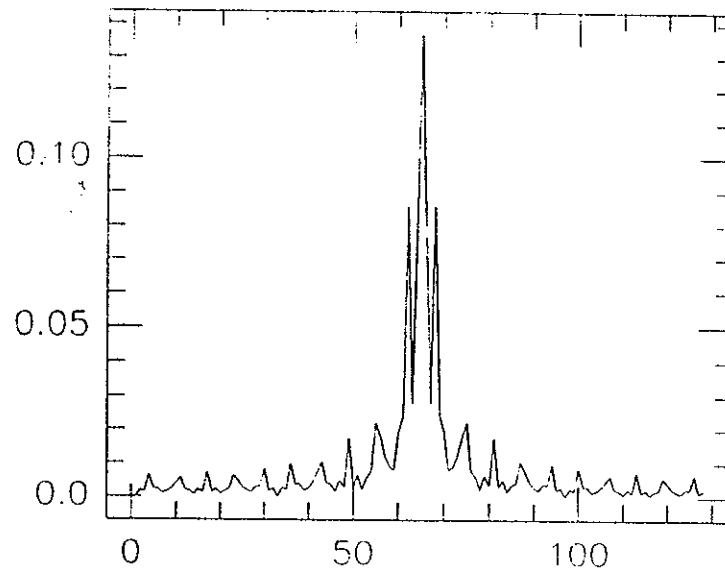
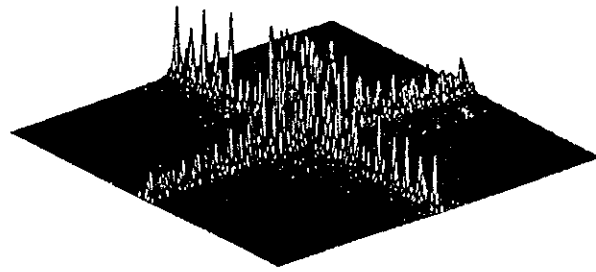
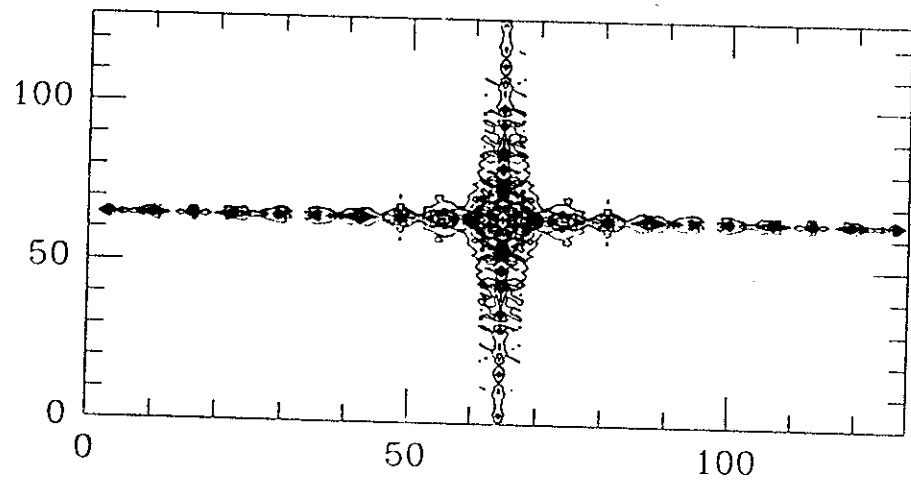
a)



b)

Figura 9.

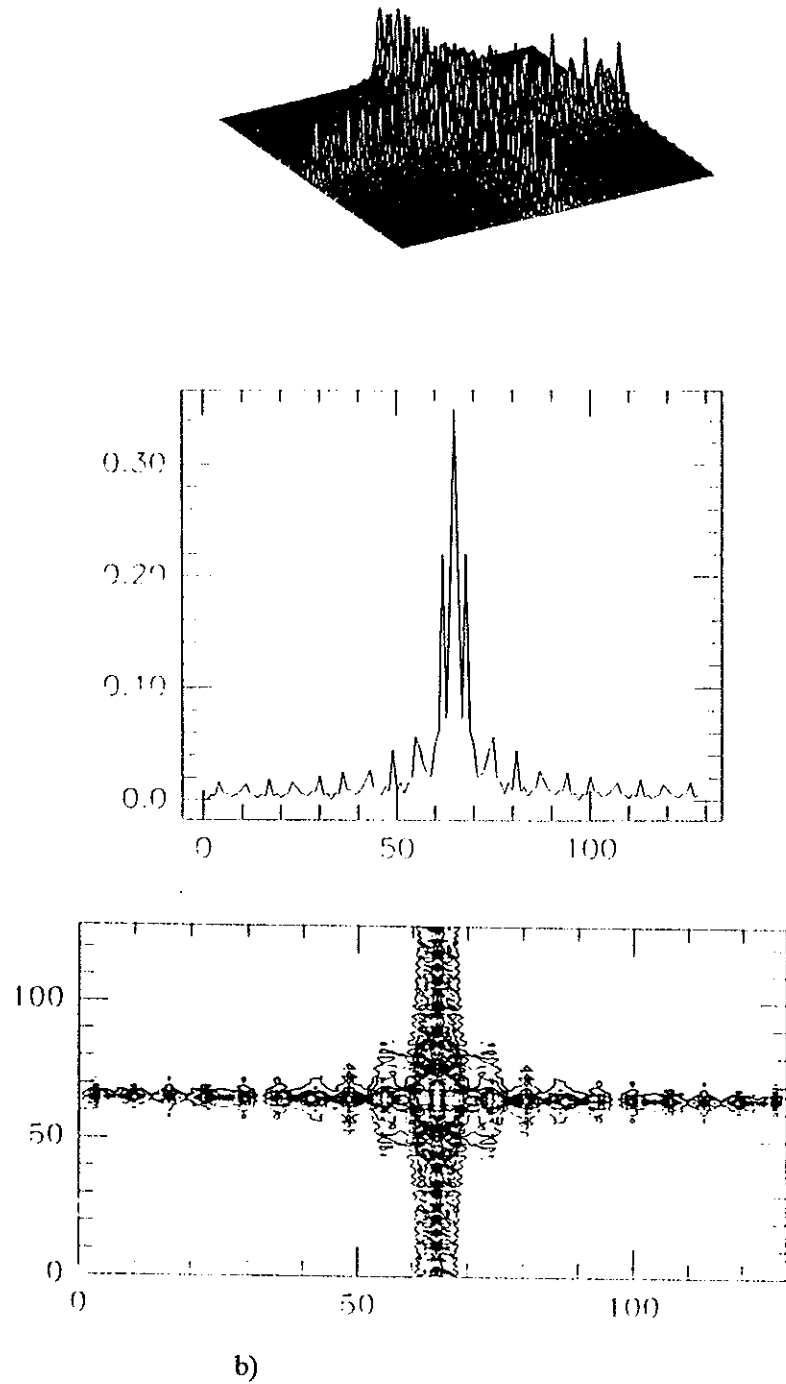
Histogramas de amplitud extendida por la técnica de ensanchamiento de histograma a) empleando 50 niveles y b) 128 niveles de histograma.



a)

Figura 10.

Amplitudes de la transformada de Fourier del objeto de la Figura 7 después de haber sido extendida empleando a) 50 niveles de histograma y b) 128 niveles de histograma.



**Figura 10.**

Amplitudes de la transformada de Fourier del objeto de la Figura 7 después de haber sido extendida empleando a) 50 niveles de histograma y b) 128 niveles de histograma.

### V.3 Escritura de los HGC's

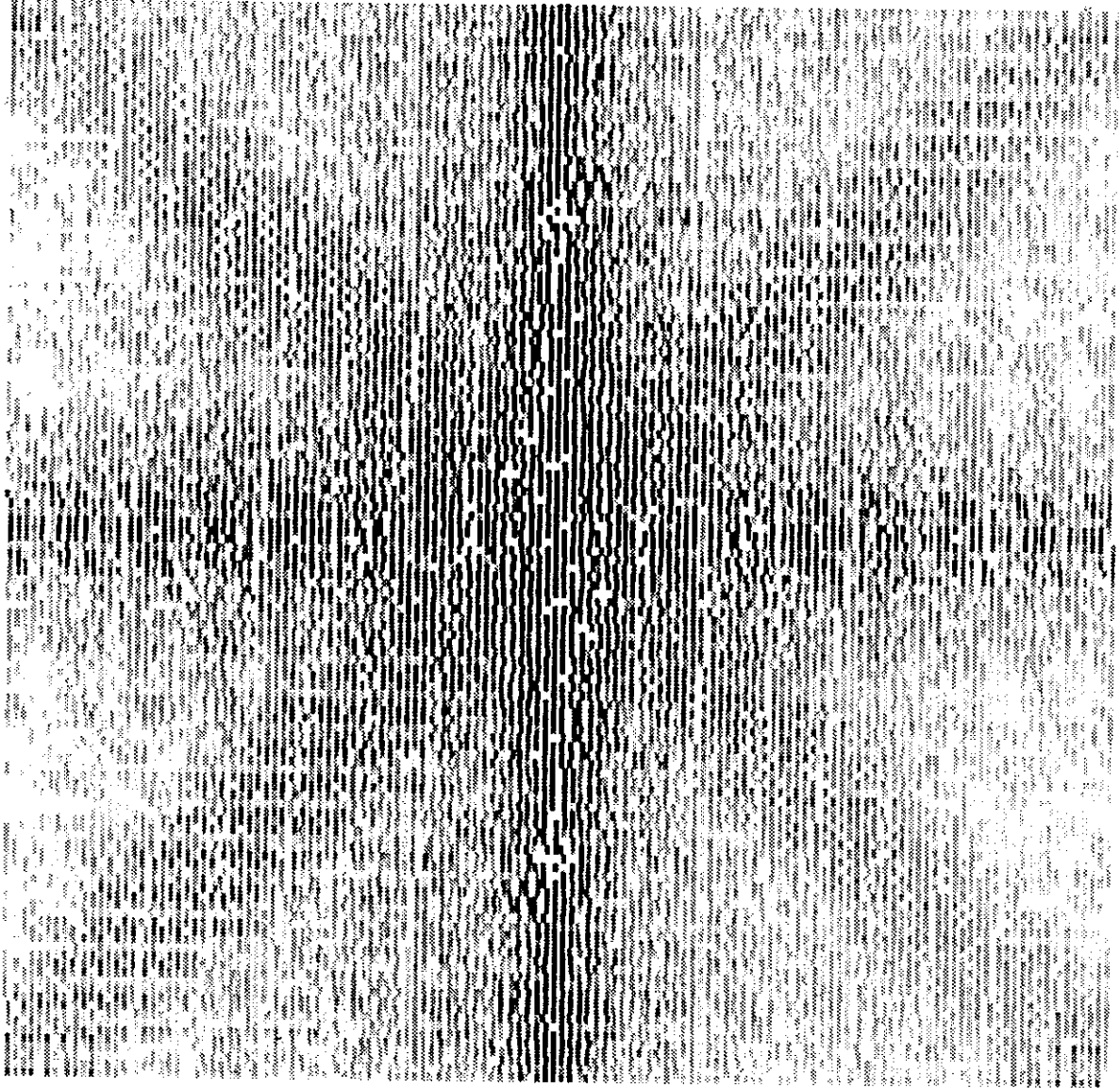
#### V.3.1 Impresión en Papel de la Información de Amplitud y Fase Generada con la Computadora.

En el caso del impresor láser con intérprete de PostScript el área de graficado disponible es de 8.5" X 11". Existe interdependencia entre el área disponible, la resolución del impresor, el número de muestras del HGC y la cantidad de cuantización de la amplitud y de la fase. Para HGC's representados en 128X128 muestras se consideró un área de 8.1" X 8.1" (20.57472mm por 20.57472mm) para la representación gráfica de los hologramas, de acuerdo con lo cual las dimensiones de la celda del holograma fueron de 1.6074 mm por 1.6074 mm. De acuerdo con esto, los valores para la fase quedaron cuantizados en 19 posiciones.

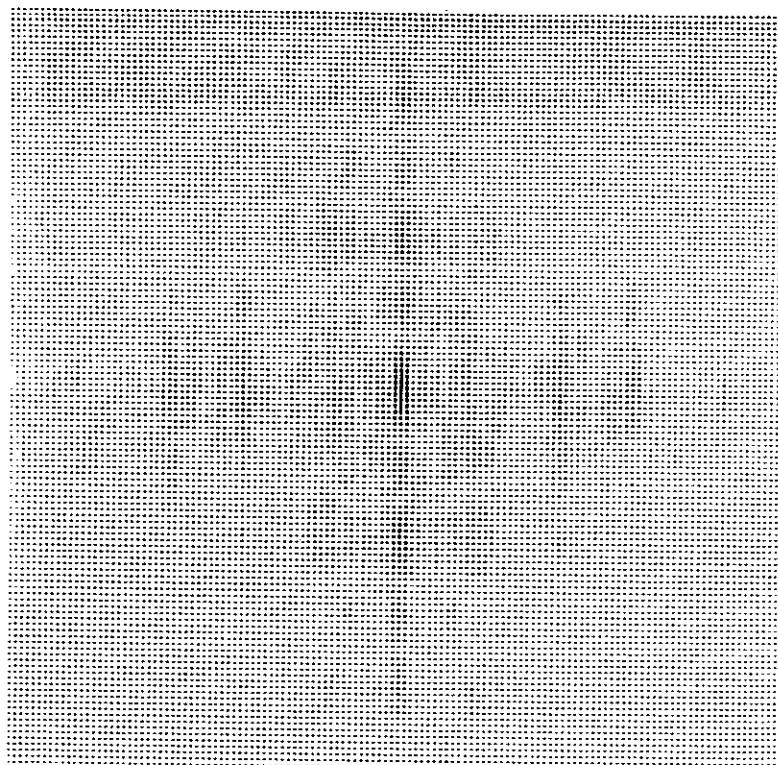
La transmitancia de amplitud fue representada como variación de la altura de los rectángulos y como variación del nivel de gris en rectángulos de altura constante. Fue posible aprovechar la máxima resolución de 256 niveles de gris del impresor láser. En la Figura 11 se muestra un holograma en donde la amplitud se representó como variación del nivel de gris de los rectángulos dentro de las celdas.

De acuerdo a su resolución el impresor láser no tiene la capacidad de graficar puntos de espesor inferior a 0.0846 mm, por lo que las amplitudes correspondientes a espesores inferiores serían omitidas en la gráfica; sin embargo se observó que el impresor implementó una línea de mínimo espesor aún para valores nulos de amplitud. Lo anterior implica introducir al HGC información de amplitud adicional que no corresponde en realidad al espectro de Fourier del objeto. Es de esperar que en la reconstrucción se incremente el ruido en el patrón observado en el plano de la imagen. Ese problema fue resuelto haciendo algunos cambios en la programación en PostScript para el graficado de los HGC's, Figura 12.

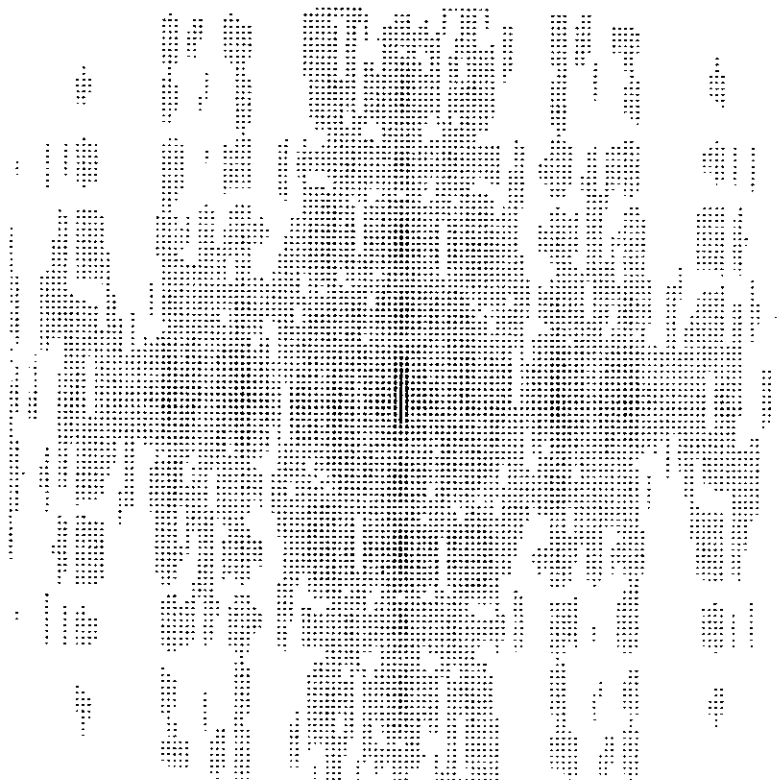
Los HGC's fueron producidos considerando arreglos de 64 por 64 y 128 por 128 elementos, Figura 13. Tomar un mayor número de elementos de resolución en una misma área de graficado implica una cuantización muy burda de la fase, con el consecuente incremento del ruido en las imágenes reconstruidas a partir de los HGC's.



**Figura 11.** HGC impreso de la letra S en donde las amplitudes se representaron como variaciones de tonos de gris.



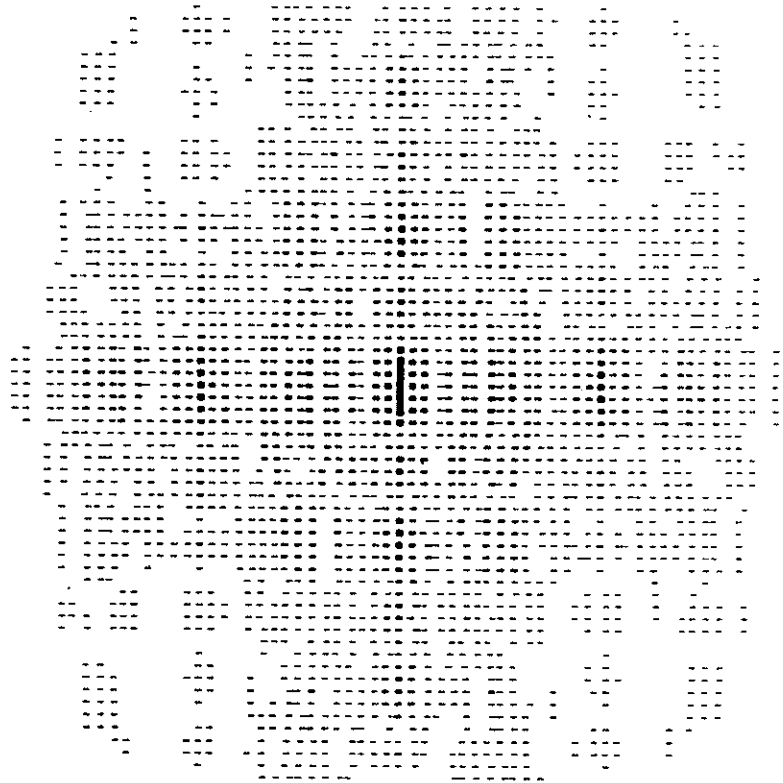
a)



b)

**Figura 12.**

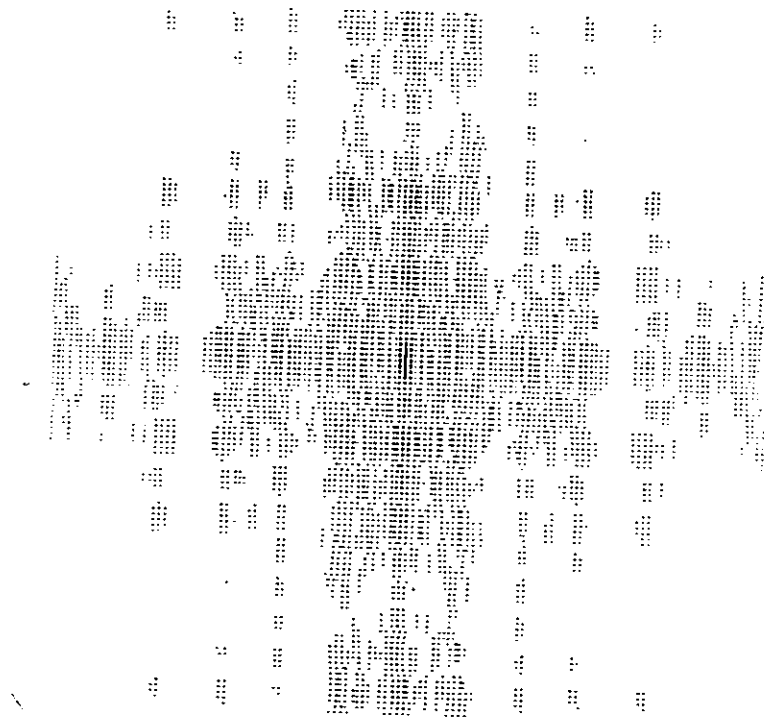
HGC's del conjunto de letras CICESE a) antes y b) después de eliminar líneas que en realidad no representan valores mínimos de amplitud.



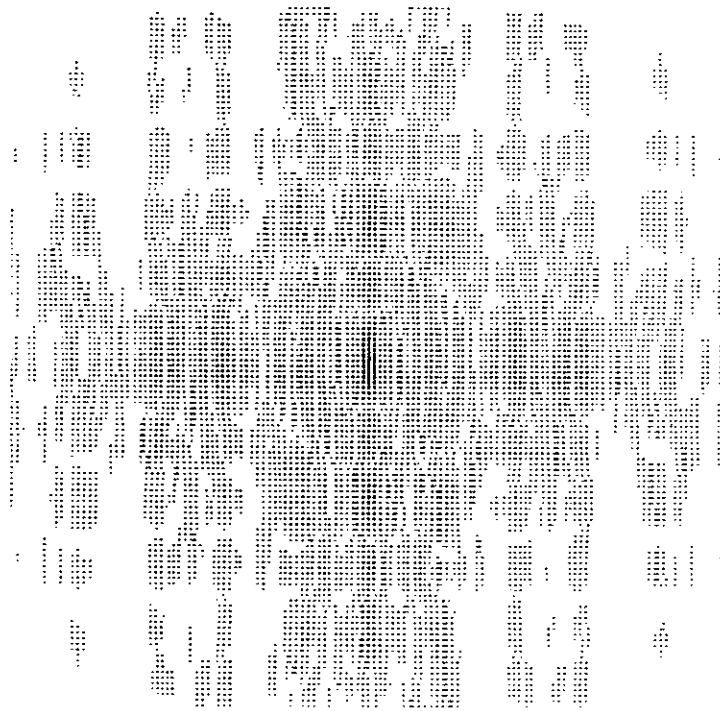
**Figura 13.** HGC del conjunto de letras CICESE representado con 64 por 64 elementos de resolución.

Se experimentó con objetos de diferentes tamaños y se observó que en la medida en que aumenta el tamaño del objeto se vuelven más significativas las frecuencias espaciales bajas en el espectro de Fourier y las frecuencias espaciales altas se van perdiendo, Figura 14.



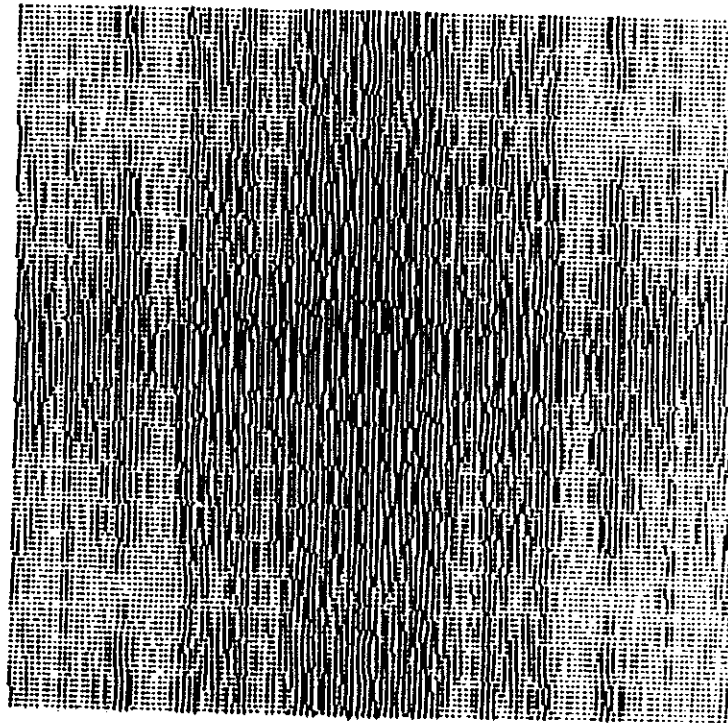


a)

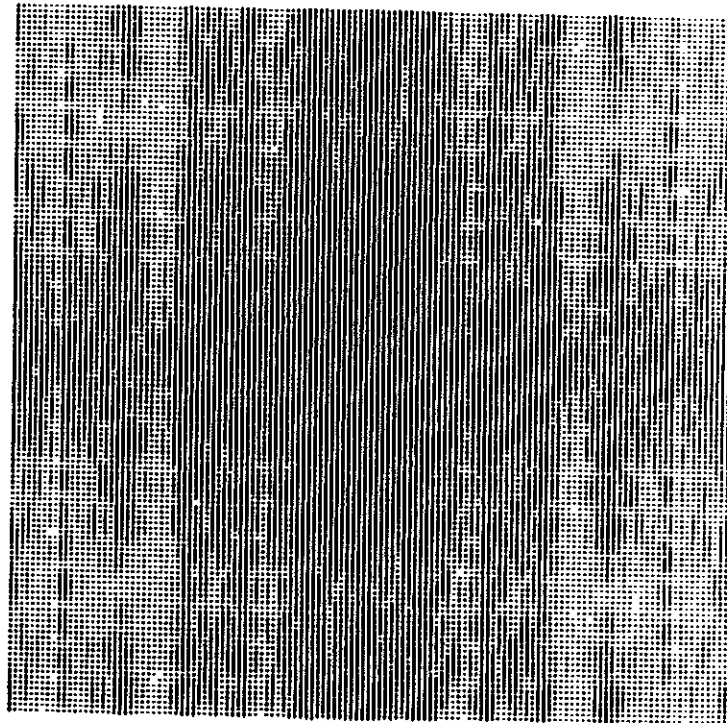


b)

**Figura 14.** HGC del conjunto de letras CICESE que ocupó a) el 20% del arreglo de muestras del objeto. b) HGC del mismo conjunto de letras ocupando el 10% del arreglo de muestras del objeto.



a)



b)

**Figura 16.**

a) HGC del conjunto de letras CICESE. b) HGC del mismo conjunto de letras, pero con la fase dividida entre  $2M\pi$ . Para ambos HGC's fueron extendidos los intervalos de amplitudes significativas.

### V.3.2 Reducción Fotográfica de los HGC's Impresos en Papel

Las primeras reducciones fotográficas se realizaron empleando una cámara Réflex de 35 mm que fue colocada a una distancia máxima de 6.0 m de la pared sobre la cual se colocaron los hologramas a reducir y se usaron las películas fotográficas "Technical Pan Film" y "Plus X Pan" ASA 125. Se emplearon varias lámparas para iluminar el holograma con el fin de aumentar la cantidad de luz captada en la película. Las reducciones obtenidas no fueron buenas ya que sobre el HGC en la película se grabó luz proveniente directamente de las lámparas de iluminación. Como consecuencia de esto se perdió casi totalmente el holograma debajo de esa luz.

Técnicamente se podían realizar escalas de reducción fotográfica de 1:170, sin embargo fue prácticamente imposible enfocar los HGC's para escalas superiores a 1:60. La máxima escala de reducción que se intentó fue de 1:86, de tal manera que a partir de un HGC impreso en un área de  $(205.47472 \text{ mm})^2$  se obtuvieron HGC's de  $(2.4 \text{ mm})^2$  sobre la película fotográfica; sin embargo vistos bajo el microscopio presentaron muy poca definición. La limitante en este caso fue el hecho de que el enfoque debe realizarse a simple vista y el ojo humano no puede resolver el detalle tan pequeño introducido a esas escalas de reducción.

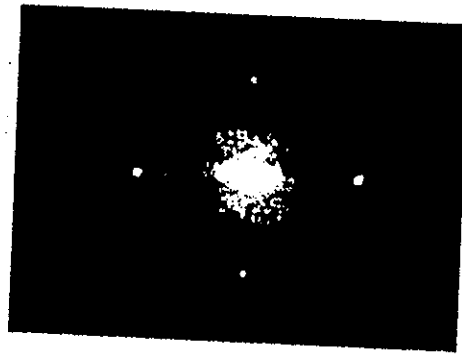
Debido a lo anterior se decidió sacrificar la escala de reducción por la calidad de las reducciones, de manera que la cantidad máxima de reducción fotográfica con la que se consiguieron hologramas con definición aceptable fue aproximadamente de 1:46.

Con el objeto de probar si esa escala de reducción fue suficiente se fotografiaron y redujeron HGC's que aparecen impresos en un texto sobre el tema [Boardman (1980)], Figura 22. El tamaño de las celdas considerado para la fabricación de esos HGC's fue de 3.375mm y el número de muestras 80 x 80. El tamaño de los HGC's reducidos fue de  $(5.0 \text{ mm})^2$ , de manera que la escala de reducción fue de 1:54, siendo posible observar la imagen esperada. Esta escala no está tan distante de la obtenida para los HGC's del presente trabajo, por lo cual puede decirse que esta última resulta suficiente.

#### V.4 Reconstrucción Óptica de Imágenes a Partir de los HGC's

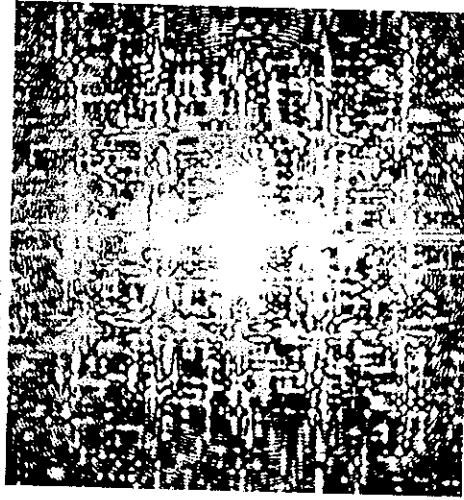
El sistema óptico empleado para la reconstrucción óptica de las imágenes a partir de los hologramas se muestra en la Figura 5.

A partir de las reducciones fotográficas en escala de 1:86 no se observó la reconstrucción de las imágenes y los órdenes de difracción se observaron poco definidos. Lo anterior se debió a la imposibilidad de enfocar los patrones tan pequeños en la reducción fotográfica, Figura 17.



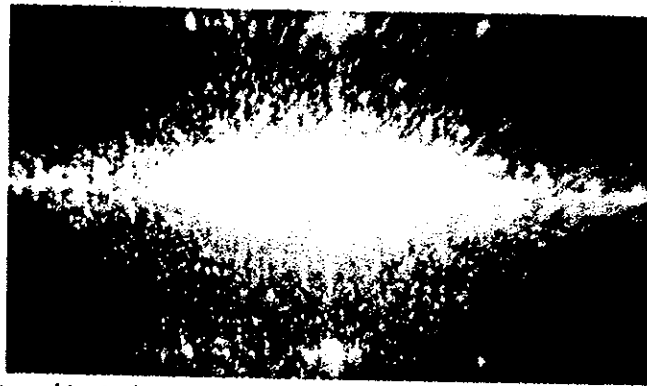
**Figura 17.** Reconstrucción óptica a partir de un HGC cuya reducción fotográfica fué de mala calidad debido a la dificultad de enfocar adecuadamente.

Se disminuyó la escala de reducción fotográfica buscando grabar el detalle de los HGC's, quedando en proporción de 1 a 46. Si bien se observaron órdenes de difracción la presencia de ruido impidió observar si se formaron o no las imágenes esperadas, Figura 18. Para las escalas de reducción menores se observaron más próximos los órdenes de difracción.



**Figura 18.** Reconstrucción óptica a partir del HGC de un carácter E. La escala de reducción limitada de 1:46.

Al introducir el factor  $2M\pi$  se observó un mejoramiento en los patrones reconstruidos de los HGC's en el sentido de que se redujo la cantidad de ruido y se apreciaron formaciones más cercanas a las imágenes esperadas. Es preciso experimentar más con la codificación de la fase para lograr mejores resultados (véase Figura 19); se realizaron pruebas de calidad en la escritura de las imágenes obtenidas del impresor ya que cualquier variación de la posición de escritura del elemento de imagen redonda en una incertidumbre del valor de la fase para ese elemento, dando como resultado el no observar la imagen holográfica.



**Figura 19** Reconstrucción óptica del HGC en el que la fase fue dividida entre  $2M\pi$ . El HGC se produjo a partir del conjunto de letras CICESE como objeto.

Si bien no se observaron buenos resultados durante la reconstrucción óptica sí se pudieron apreciar los efectos de las rutinas de mejoramiento de las imágenes. Así, se observó el incremento en la brillantez de los patrones reconstruidos como efectos de la extensión del intervalo de amplitudes significativas en los HGC's, como se predice en la teoría. También se apreció el incremento en la intensidad de los órdenes

difractados como efecto de la implementación de la fase aleatoria. Los patrones observados a partir de HGC's representados con 64 por 64 elementos de resolución presentaron más ruido y menor separación entre los órdenes de difracción que los patrones observados a partir de HGC's en 128 por 128 elementos.



**Figura 20.** Se muestra la reconstrucción óptica a partir del HGC del conjunto de letras CICESE representado en 64 por 64 elementos de resolución.

#### V.5 Pruebas de Calidad de Escritura

Como se describió en la sección, se escribieron patrones de líneas rectas con el impresor láser PostScript con el objeto de analizar la calidad de escritura del dispositivo. En la Figura 6.a se muestra una rejilla consistente de 288 líneas en 213.445 mm. Puede observarse que el espesor de las líneas no es constante, después de dos líneas del mismo espesor aparece una tercera más ancha. En la Figura 6.b se muestra una rejilla con 128 líneas en 205.7472 mm en la cual se aprecia un patrón consistiendo de tres líneas de igual espesor seguidas de una más gruesa. Puede observarse que existen diferencias entre el ancho esperado y el real en los patrones y que a medida que las líneas son más gruesas el ancho real se acerca más al esperado.

De la superposición de dos patrones de líneas aparentemente idénticos se esperaba observar un conjunto de franjas rectas de Moiré producto de las intersecciones de las líneas de los patrones. En la Figura 21 se muestran franjas de Moiré obtenidas a partir de dos imágenes escritas con el impresor a partir del mismo archivo de datos.



a)



b)

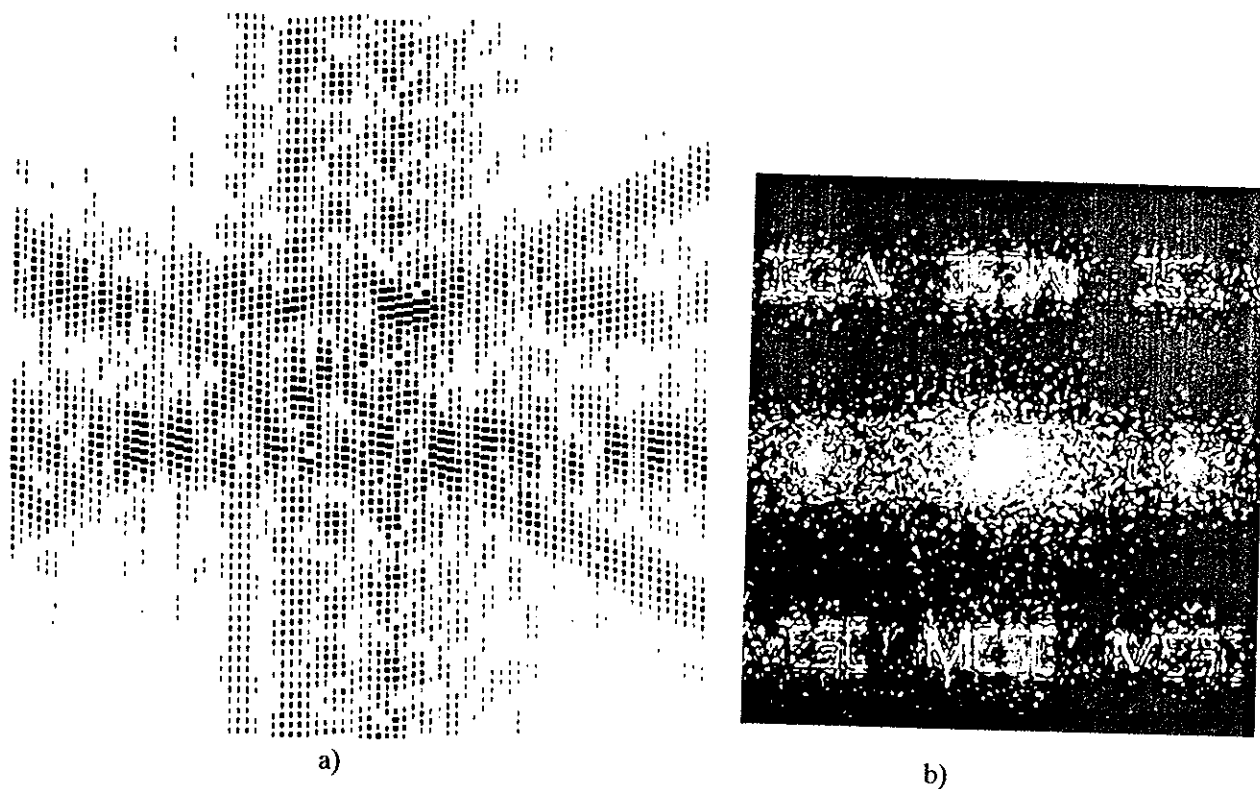
**Figura 21.**

a) Franjas de moiré a partir de dos patrones de líneas de frecuencia 0.6221 ciclos/mm. El ángulo de inclinación entre los patrones fue de  $0.52236^\circ$ . b) Franjas de moiré a partir de patrones de líneas de frecuencia 1.35 ciclos/mm, a un ángulo de inclinación de  $12.25^\circ$ .

Como puede observarse las franjas de moiré obtenidas no son líneas rectas, presentan severas deformaciones producto de variaciones en las posiciones de las líneas de los patrones en apariencia idénticos. Un cálculo de esas variaciones mostró que alcanzaron valores superiores a la resolución del dispositivo de escritura. Tomando en cuenta que el ancho de los pasos para las posiciones de fase corresponde al del ancho mínimo del punto de escritura (en el límite de resolución) es posible decir que los errores de fase introducidos por errores de escritura del impresor influyeron en el proceso de codificación de los HGC's y por tanto también en la reconstrucción de las imágenes esperadas a partir de éstos.

Los HGC's generados en el presente trabajo son de la misma frecuencia que la rejilla de la Figura 6.b, por lo cual es de esperar que se haya presentado variación entre los espesores real y teórico de los rectángulos en los HGC's. Esta variación es significativa si se tiene en cuenta que el ancho de los rectángulos está directamente relacionado con la inclinación del haz de referencia del arreglo considerado en la codificación de los HGC's (véase Figura 2), de manera que la incertidumbre en el proceso de codificación de la fase para los HGC's es alta.

Con los resultados de las pruebas de calidad en la escritura se deduce que lo que se observa en las figuras 18, 19 y 20 son solamente imágenes que contienen información de amplitud y con esto sólo se obtiene en la reconstrucción el patrón de difracción que se espera del HGC.



**Figura 22.**

a) HGC con 80 X 80 elementos de resolución y dimensión de 3.375mm, b) Reconstrucción holográfica del objeto representado en a). [ Tomado como referencia de A.D. Boardman 1980 ].



## VI CONCLUSIONES

A lo largo de este escrito se ha presentado un resumen del trabajo realizado con el fin de experimentar en la la fabricación de hologramas de Fourier generados por computadora, empleando un impresor láser PostScript como dispositivo de escritura y tomando como base el método de Lohmann para la codificación de la información de amplitud y de fase.

En el Capítulo I de esta tesis se presentaron en forma breve los conceptos básicos de la holografía generada por computadora y se comentaron aspectos relevantes como: la motivación e importancia del trabajo, los principales problemas encontrados al llevarlo a cabo y los puntos que marcaron pautas a seguir para la terminación del mismo.

En la parte correspondiente a los fundamentos teóricos, las secciones más importantes son la presentación del problema general de la producción de HGC's y la descripción del proceso de fabricación de HGC's en base al método de Lohmann para la codificación de amplitud y de fase.

Más adelante se plantearon los aspectos a considerar para la elección del equipo involucrado en la fabricación de HGC's. Se dieron a conocer sus características más generales y se remarcaron en particular las del dispositivo de escritura empleado.

Una de las conclusiones más importantes que se obtuvieron del presente trabajo consistió en que el equipo de cómputo y de escritura de los hologramas introduce limitaciones de tipo técnico en la modelación del objeto. Debido a eso, el número de muestras a tomar para la representación en la computadora del objeto no es arbitrario.

Una forma de propiciar que las imágenes reconstruidas a partir de HGC's sean de la mejor calidad posible, presenten buena definición, bajo ruido y poca distorsión radica en generar hologramas a partir de objetos representados en el mayor número de muestras posible. Por tanto fue de suma importancia tener un conocimiento del equipo de cómputo y de escritura.

Los factores que intervinieron en la elección del número de muestras a tomar del objetos fueron, por un lado, la capacidad de memoria y la velocidad de procesamiento de la computadora con la que se efectuó el cómputo del holograma y por otro lado, la capacidad de memoria y la resolución en puntos por unidad de área de los dispositivos de escritura empleados en la representación gráfica de la información de amplitud y de fase del HGC.

Posteriormente fueron presentadas las características del impresor láser con intérprete de lenguaje PostScript como equipo de escritura de los HGC's, y se observó que es práctico en relación a la facilidad

que brinda en el proceso de graficado. Sin embargo, en base a los resultados obtenidos del presente trabajo se observó que es sumamente importante realizar pruebas de calidad de escritura al dispositivo de graficado a emplear, para detectar, corregir y superar, en lo posible, los errores de posicionamiento.

Después de la descripción del equipo empleado se describió el proceso completo para la realización de los HGCs. El primer paso en el proceso fue la representación en muestras numéricas del objeto del que se deseó obtener el holograma.

Es importante tomar en cuenta que en la representación de las muestras del objeto está implicado un proceso de cuantización, puesto que la cuantización se considera comúnmente como la conversión de una función continua en una función discreta. Se debe considerar la cuantización involucrada en el muestreo de objetos representados en diferentes tonos de gris; cuando las muestras tomadas abarcan un área del objeto que a su vez abarca diferentes tonos de gris, esa área se debe traducir a un solo valor muestreado. Esa traducción se obtiene a través de un promedio de los niveles de gris incluidos en esa área, con lo cual un continuo de grises queda cuantizado en un solo valor.

La descripción de las consecuencias del ineludible proceso de cuantización es un aspecto importante y está estrechamente relacionado con el proceso de escritura. En el presente trabajo se observó que tanto este proceso como el dispositivo de escritura son aspectos determinantes en el diseño y fabricación de HGC's.

Si el proceso de muestreo se realiza a una razón suficientemente alta no implicará pérdida significativa de información de la función original. Sin embargo cuando los valores muestreados son cuantizados se añaden errores a la función original.

Para efectuar la transformación de Fourier del arreglo de muestras del objeto se empleó el algoritmo de la transformada rápida de Fourier, FFT, que permitió que el proceso de cómputo del holograma fuera rápido. La capacidad de memoria y la velocidad de operación del equipo de cómputo empleado añadieron rapidez al proceso de cómputo de las transformadas de Fourier y permitieron que los procesos computacionales de manipulación de la información de amplitud y de fase y los procesos de adaptación de esa información a los dispositivos de escritura no resultaran demasiado lentos e imprácticos.

La cantidad de puntos por holograma impreso fué de  $8'' \times 8'' = 64 (300)^2 = 5.76 \text{ M}$  pixeles. Por tanto, se requieren grandes cantidades de memoria en la síntesis de HGC's.

En el proceso de escritura el límite principal de los HGC's radica en que el número de puntos disponible para codificar la transmitancia de amplitud y la fase está restringido al número de elementos de resolución del dispositivo de escritura empleado. Por ejemplo, en el caso de un impresor láser como el

empleado, al graficar un holograma de  $128 \times 128$  puntos dibujado sobre un área cuadrada de  $(18 \text{ cm})^2$  se dispone de cerca de 8 puntos para codificar los grises, considerando que la resolución del impresor es de 300 puntos por pulgada.

En el Capítulo V de la tesis se presentaron los resultados obtenidos en cada uno de los pasos que conforman el proceso de fabricación de HGC's.

Durante la reconstrucción óptica no se observaron las imágenes esperadas a partir de los HGC's, por lo que se procedió a revisar cada una de las partes involucradas en el proceso de fabricación de los HGC's, siendo éstas: la transformación de Fourier del objeto, el proceso de reducción para el caso de las imágenes del impresor láser y la codificación de la amplitud y fase en el HGC.

Respecto a la transformación de Fourier se observó que el cómputo de las transformadas se realizó correctamente al obtener los objetos originales a partir de las transformadas inversas de Fourier.

En segundo término se procedió a verificar el proceso de reducción fotográfica. En esta etapa se decidió fotografiar un patrón holográfico generado por computadora presentada en el trabajo de Boardman (1980). Al HGC obtenido de esta se le aplicaron los mismos procedimientos de reducción fotográfica efectuados en los HGC's codificados en el presente trabajo. De la reconstrucción óptica se observó la imagen esperada, por lo que se concluyó que el proceso de reducción fotográfica empleado fue el correcto.

Una vez que se verificó que el proceso de reducción fotográfica efectuado fue correcto, restó revisar el proceso de codificación, para lo cual se probó el proceso de escritura de los HGC's obtenidos.

Se verificó que la codificación de amplitud fue realizada correctamente al analizar directamente los patrones de la transformada de Fourier del objeto. Para revisar el proceso de codificación de la fase se procedió a realizar la escritura de varios patrones de líneas de diferentes frecuencias espaciales. Cada patrón fue escrito dos veces para analizar qué tan fielmente puede reproducir el impresor un mismo patrón. Para este análisis se realizaron pruebas geométricas de Moiré. A partir de las franjas de Moiré observadas se pusieron de manifiesto errores en el posicionamiento de los elementos de imagen impresos: elementos de imagen homólogos fueron impresos en diferentes coordenadas. Del análisis de estos patrones se determinó que los errores de posicionamiento llegaron a ser incluso mayores que el ancho de los pasos de variación de fase de los HGC's. Se observó además que se requieren más de dos puntos para tener un ancho correcto en las líneas de los patrones; esto quiere decir que para un espesor de línea de, por ejemplo, dos puntos el impresor produce líneas del doble de espesor esperado. Los desórdenes en la escritura de la fase impidieron reconstruir las imágenes a partir de los HGC's ya que en todo holograma debe estar presentes la información de amplitud y la fase de la función compleja que define al objeto.

Se requiere la corrección electromecánica del impresor láser para optimizar la forma de escritura del aparato. Esto no se realizó por estar fuera del alcance tanto técnico como en tiempo de los objetivos de este trabajo.

Una conclusión de importancia radica en que a pesar de que el trabajo realizado en torno al microdensitómetro como dispositivo de escritura de HGC's no quedó concluido, fue muy útil dado que permitió generar algunos parámetros de referencia en base a los cuáles determinar ventajas y desventajas con respecto al impresor láser PostScript en aspectos del proceso de escritura de HGC's, como son la determinación del número de muestras a tomar, el grado de complejidad en programación computacional, del tiempo empleado hasta el grabado en material fotosensible de los HGC's y los costos implicados.

El impresor láser con intérprete de PostScript en combinación con un proceso adecuado de reducción fotográfica constituye una opción eficaz para la fabricación de elementos ópticos sintéticos difractores de luz y para la fabricación de filtros espaciales para procesamiento óptico.

Hasta aquí se han presentado las conclusiones sobre el desarrollo del presente proyecto de tesis. Sólo resta mencionar las contribuciones principales que produjo el trabajo de tesis proyecto:

- a) Haber empleado paralelamente dos diferentes técnicas para plasmar sobre material fotosensible la información de amplitud y de fase de los hologramas de Fourier generados por computadora, y
- b) Haber empleado un microdensitómetro modelo Micro-10 para la escritura sobre material fotosensible de los hologramas de Fourier generados por computadora, así como haber desarrollado una forma para escribir puntos más pequeños mediante la adaptación de un carrusel con aberturas de digitalización más pequeñas y haber caracterizado la respuesta del sistema microdensitométrico a resolución óptica del orden de micras.

Por último cabe decir que el trabajo de tesis que se ha presentado aquí resultó muy formativo debido a los requerimientos teóricos y técnicos que implicó.

## ANEXO I

### AI Introducción

Se presenta el trabajo realizado en torno a la fabricación de hologramas de Fourier generados por computadora, empleando un microdensitómetro modelo micro-10 y en base al método de Lohmann para la codificación de la información de amplitud y fase.

La principal motivación de emplear el microdensitómetro como dispositivo de escritura de HGC's radicó en las ventajas que presenta con respecto a otros dispositivos de escritura, ventajas tales como la posibilidad de grabar directamente sobre material fotosensible la información de amplitud y de fase, la rapidez con la que reconstruye la información digital, posibilidad de escoger de entre varias opciones la forma y tamaño del punto de reconstrucción. Esto último dio la facilidad de grabar cada renglón de celdas con un solo barrido.

La única parte del proceso de fabricación de HGC's con el microdenstiómetro que no resultó práctica fue la transferencia de los arreglos de información de amplitud y fase del sistema Sun a la cinta magnética, de donde este aparato toma la información a ser reconstruida. Esto último se debió a que las dimensiones de los arreglos de datos, adecuados al microdensitómetro, aumentaron dado que en la representación de cada celda de holograma no se empleó un solo punto sino una matriz de puntos.

Las principales aportaciones del trabajo con el microdensitómetro consistieron, por un lado, en generar una referencia con la cual comparar este aparato con otros dispositivos y determinar ventajas y desventajas en la fabricación de HGC's; por otro, en haber implementado una técnica para escribir elementos de imagen más pequeños con el microdensitómetro.

## AII Equipo y Material

### AII.1 Descripción del Microdensitómetro Modelo Micro-10.

El microdensitómetro es un sistema de adquisición de datos de densidad/transmitancia y de posición, controlado electrónicamente, que consta básicamente de un fotómetro, un mecanismo de control de dirección y de un sistema de posicionamiento X-Y. La velocidad máxima de barrido del aparato es de 50mm por segundo. Posee controles automáticos y manuales que permiten el análisis (adquisición de datos) de un área seleccionada hasta de 254 mm cuadrados. Posee una resolución mecánica de  $\pm 1$  micrómetro, resolución óptica: 25 micrómetros cuadrados y resolución electrónica de 9 bits; representando 512 niveles de gris. El área de visión y barrido es de 254mm por 254mm (10 pulg. x 10 pulg.), de la cual cualquier porción puede ser barrida.



Figura 23. Microdensitómetro modelo Micro-10 empleado en la fabricación de HGC's.

### AII.2 Selección del Material Fotosensible.

Para elegir los materiales fotosensibles más apropiados para el proceso de escritura de los HGCs se realizaron pruebas con diferentes materiales. Se generó un perfil de grises empleando la computadora. Se reconstruyó dicho perfil con el microdensitómetro empleando diferentes películas fotosensibles para calibrar la respuesta de cada una a diferentes intensidades de sensibilización en el proceso de escritura.

En la Tabla IV se muestran los valores de calibración análoga (o ganancia) para el microdensitómetro usados en la sensibilización de las películas en el proceso de reconstrucción; el valor de calibración corresponde a la exposición por unidad de tiempo necesaria para obtener una densidad de 1.0 de la curva característica del material fotosensible.

**Tabla IV** Valores de calibración análoga (o ganancia) para el microdensitómetro en las películas fotosensibles empleadas para generar un perfil de grises de referencia.

Material	Ganancia del microdensitómetro
Fotográfico:	
Technical Pan Film	1.075, 2.15, 4.30
TMAX asa 400	2.15, 4.30
TRI X Pan	2.15, 4.30
PLUS X Pan	2.15, 4.30
Holográficas:	
10E75	4.30

El material fotosensible seleccionado fue el TRI X Pan, debido a que las variaciones de gris quedaron mejor representadas ya que su contraste es suave.

### **AIII Codificación por Medio del Microdensitómetro**

El microdensitómetro tiene la capacidad de sensibilizar material fotográfico u holográfico en diferentes proporciones, en función de la variación de intensidad del diodo emisor de luz que emplea.

Los diferentes valores de amplitud de los HGC's se implementaron con este aparato como variaciones de transmitancia en el material de grabado y considerando un intervalo de 256 niveles de intensidad. Las variaciones de fase se representaron como variaciones de la posición del rectángulo dentro de las celdas.

#### **AIII.1 Escritura de HGCs Empleando el Microdensitómetro.**

En el aspecto técnico del empleo del microdensitómetro fue posible realizar la escritura de los hologramas directamente sobre la película fotográfica.

En el aspecto gráfico, la implementación de la información de amplitud y de fase consistió en escribir un rectángulo de ancho fijo, de altura fija y de nivel de gris dependiente del valor de amplitud del parámetro complejo en particular a representar. Los diferentes valores de amplitud fueron representados empleando el microdensitómetro como variaciones en transmitancia de la película fotosensible.

La forma en que el Micro-10 crea los puntos que emplea para escribir información consiste en formar la imagen de una abertura iluminada con un diodo emisor de luz sobre la superficie donde se coloca el material fotosensible. El aparato cuenta con un juego de ocho aberturas, circulares, rectangulares y cuadradas, de las cuales se elige la que más convenga, según la dimensión del elemento de imagen que compone al holograma.

Para reconstruir los hologramas se eligió una abertura rectangular con dimensiones del punto de escritura de  $5 \mu m \times 105 \mu m$ . De acuerdo con esas dimensiones cada celda se generó escribiendo 21 veces cada punto rectangular con el fin de cuantizar la fase en 21 posiciones.

Considerando que cada punto imagen del HGC consiste de un rectángulo de la mitad de ancho de la celda, se generaron posteriormente celdas de 42 posiciones en las cuales se escribiera el valor de amplitud correspondiente 21 veces. Con esto fue preciso además escribir dos veces cada línea horizontal



de datos, (cada arreglo de datos de amplitud se formaba de un total de 128 líneas de datos) para que cada celda generada tuviera la figura cuadrada. Una consecuencia de esto es que después de la reconstrucción de cada holograma, fué del doble de las dimensiones que al representar cada celda con 21 puntos rectangulares.

Los archivos de datos de amplitud generados considerando 21 posiciones de fase por celda tuvieron dimensiones de (21X128) columnas y 128 renglones; en el caso de 42 posiciones de fase las dimensiones fueron de 42X128 columnas y 128 renglones. En estos archivos de datos la información de amplitud había sido ya cuantizada, de acuerdo a la resolución en niveles de gris del microdensitómetro.

Con el fin de escribir con el microdensitómetro los HGCs fue preciso adecuar los archivos de datos al formato del lector de cintas del aparato (800 BPI's), para lo cual fue necesario transferir esos archivos del sistema SUN al sistema PRIME y emplear un programa que contiene varias rutinas de conversión de formato [Hinojosa, (1990)]. Una vez almacenados en cinta magnética los datos de amplitud y fase quedaron listos para ser reconstruidos con el microdensitómetro.

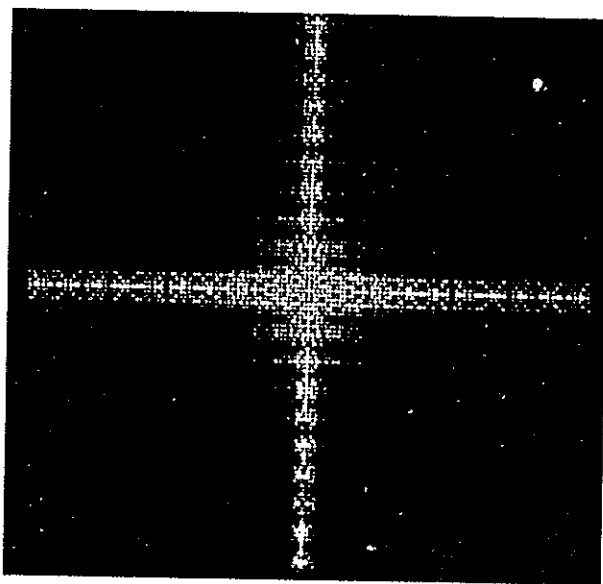
Para iniciar una reconstrucción con el microdensitómetro se debe realizar la siguiente secuencia:

- a) Preparación de la cinta magnética.
- b) Obtención del histograma de los datos a reconstruir para obtener los valores máximo y mínimo del archivo de datos de la imagen.
- c) Colocar la cinta magnética al inicio del archivo de datos a reconstruir.
- d) Calibración del microdensitómetro para reconstrucción. Este proceso se realiza en dos partes:
  - d.1) Calibración óptica del aparato.
  - d.2) Calibración analógica.
- e) Determinación de los parámetros de reconstrucción, tales como la longitud máxima de la imagen y el tamaño de cada elemento de imagen.
- f) Determinación de la posición de la película fotosensible en la que se llevará a cabo la reconstrucción y ajustar las coordenadas del punto de inicio.
- g) Asignación del modo automático al aparato.
- h) Activación de la cinta magnética.
- i) Determinación del sentido de la reconstrucción.
- j) Encendido de los motores.
- k) Desactivación de luces del tablero y eliminar toda luz que pudiera velar la película fotosensible.
- l) Colocar la película fotosensible en el plato de reconstrucción.
- m) Enviar la orden de reconstrucción desde la terminal al aparato.

A partir de aquí el microdensitómetro toma la información de la cinta magnética y procede a reconstruir la imagen sobre la película fotosensible, de acuerdo a la programación y a los parámetros que le fueron dados a través de la secuencia de pasos anterior.

### AIII.2 Graficado por Medio del Microdensitómetro

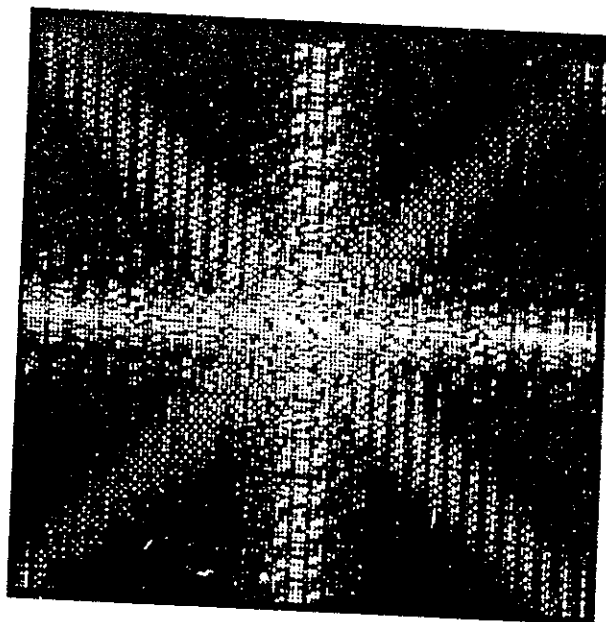
En total se generaron con la computadora 8 hologramas para ser escritos con el microdensitómetro, de las cuales solamente fue posible escribir los mencionados en al Tabla VI pues el aparato quedó fuera de servicio. En la Figura 24 se muestran impresiones en papel de hologramas reconstruidos con el microdensitómetro.



a)

Figura 24.

HGCs escritos con el microdensitómetro.

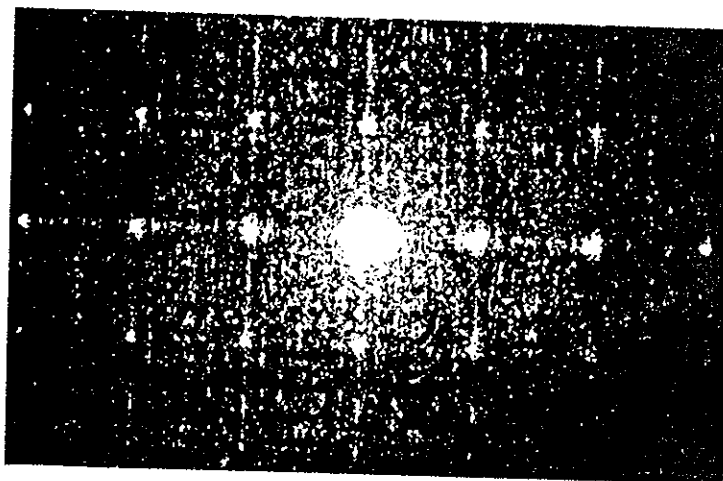


b)

**Figura 24.**

HGCs escritos con el microdensitómetro.

Los HGCs reconstruidos con el microdensitómetro se observaron bien definidos bajo el microscopio. En la Figura 25 se muestra la reconstrucción óptica a partir del HGC de un carácter E reconstruido con el microdensitómetro.

**Figura 25.**

Reconstrucción óptica del HGC escrito con el microdensitómetro, a partir de un carácter E como objeto. La escala de reducción fue de 1:15.

Si bien no se observaron buenos resultados en la reconstrucción óptica, también se apreciaron los efectos de las rutinas de mejoramiento de las imágenes. Así se observó el incremento en la brillantez de los patrones reconstruidos como efectos debido a la extensión del intervalo de amplitudes significativas en los HGC's. También se apreció el incremento de la intensidad de los ordenes de difracción, ésto debido al efecto de implementación de la fase aleatoria. Los patrones observados de los HGC's con 64X64 elementos de resolución, presentaron mas ruido y, desde luego, menor separación de los órdenes de difracción que los HGC's con resolución de 128X128 elementos.

Por último cabe mencionar que en el caso del microdensitómetro, como dispositivo de escritura, la codificación de grises no depende del número de puntos empleados para representar cada celda del holograma sino del intervalo de niveles de gris que brinda. El mecanismo de este aparato permitió plasmar los puntos formando el HGC con intensidades en un intervalo de 512 diferentes niveles de gris, directamente sobre material fotosensible. Este intervalo es bastante amplio, de manera que no representó una limitante significativa en la codificación de las variaciones de amplitud de hologramas.

## LITERATURA CITADA

- Arnold, S. M., 1985, Electron beam fabrication of computer generated holograms, *Opt. Eng.* 24, 803.
- Bartlett, H.O., K.D. Foster, 1978, Computer generated holograms with reduced phase errors, *Opt. Commun.* 26, 12.
- Bryngdahl, O., W-H Lee, 1975, Laser beam deflection using computer generated holograms, *J.O.S.A.* 65, 1124(a).
- Bryngdahl, O., 1975, New technique of laser beam deflection using computer generated holograms, *Opt. Commun.* 15, 237.
- Brown, B.R., A.W., Lohmann, 1966, Complex spatial filtering with binary masks, *Appl. Opt.* 5, No.6 967-969.
- Burch, J.J., 1967, Proc. A new method of generating holograms by computer, *IEEE* 55, 599.
- Burchardt, C.B., 1970, A simplification of Lee's method of generating holograms by computer, *Appl. Opt.* 9, 1949.
- Campos, Turón, Yzuel, Vallmitjana (Recibido 1990), Phase-only filters codified with Burchardt's method.
- Casasent, D.P., 1985, Computer generated holograms in pattern recognition: a review. *Opt. Eng.* 24, 5, 724.
- Cederquist, J., A.M. Tai, 1984, Computer-generated holograms for geometric transformations, *Appl. Opt.* 23, No.18, 3099-3104.
- Clark Ch. W., 1989, Computer generated Holography using a laser printer, *Appl. Opt.* 26,6 1042.
- Chia, T.T., A.C. Goh, Y.K. Lai, 1987, Computer-generated holograms with a commercial microfilm, *Butterworth Et Co (Publishers) Ltd.* 19, No.5, 263-264.
- Chu, D.C., J.R. Fineup, J.W. Goodman, 1973, Multiemulsion on-axis computer generated hologram, *Appl. Opt.* 12, 1386.
- Chu, D.C., J.R. Fineup, 1974, Recent approaches to computer-generated color holograms, *Opt. Eng.* 13, 189.
- Farhoosh, H., 1989, Algorithm for computation of large size fast Fourier transforms in computer-generated holograms by interfaced sampling, *Optical Engineering*, 28, No.6.
- Frere, Ch., D. Leseberg, 1989, Large objects reconstructed from computer-generated holograms, *Appl. Opt.* 28, No.12, 2422.
- Freyer, J. L., R.L. Perlmutter, J.W. Goodman, 1983, Digital holography: algorithms, e-beam lithography, and 3-d display, *Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng.* 437, 38.
- Gabel, R.A., B. Liu, , 1970, Minimization of reconstruction errors with computer generated binary holograms, *Appl. Opt.* 9, No.5 1180.
- Goodman J.W., F. Loenberger, S.Y. Kung, R. Athale, 1984, Optical Processing using Computer Generated Holograms, *Proc. IEEE* 72, 850.
- Haskell, R.E., B.C. Culver, 1975, New coding technique for computer generated holograms, *Appl. Opt.*, 11, No.11 2712.
- Hinojosa, A., 1990, Rutinas para transferencia de información en sistemas Sun, Prime, Microdensitómetro, Centro de Cómputo, CICESE.
- Hossack, W.J., A.M. Darling, A. Dahdouh, 1987, Coordinate transformations with multiple computer-generated optical elements, *Journal of Modern Optics* 34, No.9, 1235-1250.

- King, M.C., A.M. Noll, D.H. Berry, 1970, 3-D object display, *Appl. Opt.* 9, 471.
- Kirk, J.P., A.L. Jones, 1971, Amplitude information for Kinoforms, *J.Opt.Soc.Am.* 61, 1023.
- Kozma, A., W-H Lee, P.J. Peters, 1971, Optical Data storage using 1-D Computer generated holograms, *IEEE/OSA, Conf. on Laser Engineering and Applications.*
- Kozma, A., 1973, in: *Topical Meeting on Optical Storage of Digital Data, Digest of Technical Papers (Optical Society of America).*
- Lee, W-H., 1970, Sampled Fourier transform hologram generated by computer, *Appl.Opt.*9, No.3, 639-643.
- Lee, W-H., 1974, Binary synthetic holograms, *Appl. Opt.* 13, 7, 1677.
- Lee, J. Andrew, D.P. Casasent, 1987, Computer generated hologram recording using a laser printer, *Appl. Opt.*, 26, 1.
- Leith, E.N., J. Upatnieks, 1964, Wavefront reconstruction with diffused illumination and three-dimensional objects, *Optical Society of America* 54, No.11, 1295-1301 .
- Leith, E. N., J. Upatnieks, 1962, Reconstructed wavefronts and communications theory, *J.Opt.Soc.Am.* 52, 1123.
- Leseber, D., Bryngdahl, O. Computer-generated rainbow holograms, *Appl. Opt.* 23, No.14, 2441-2447 (1984).
- Lessem, L.B., P.M. Hirsch, J.A. Jordan, 1968, Kinoform, *Commun. ACM* 11, 661.
- Lohmann A.W., D.P. Paris, H.W. Werlich, 1967, A computer generated spatial filter applied to code translation, *Appl.Opt.* 6, 1139
- Lohmann, A.W., D.P. Paris, 1967, Binary Fraunhofer Holograms, Generated by Computer, *Appl.Opt.* 6, 1739.
- Lohmann, A.W., D.P. Paris, 1971, Computer-generated holograms for testing optical elements, *Appl. Opt.* 10. 619-624.
- Loomis, John S., Computer-generated holography and optical testing, *Opt. Engineering*, 5. 679-685 (September-October 1980).
- Macgovern, A.J., J.C. Wyant, 1971, Optical testing using computer generated holograms, *Appl.Opt.* 10, 619.
- Nagashima, K., 1987, Improvement of images reconstructed from computer generated holograms using an iterative method, Butterworth Et. Co.(publishers), Ltd.
- Palermo, C.J., E.N. Leith, R.O. Harger, W.A. Loucka, 1970, Suppression of the holographic twin image by nonlinear techniques, *Appl. Opt.* 9, No.12.
- Ransom, P.L., 1972, Synthesis of complex Optical wavefronts, *Appl. Opt.* 11, No.11, 2554.
- Takeda, Y., Y. Oshida, Y., Y. Miyamura, 1972, Random phase shifters for Fourier transformed holograms, *Appl. Opt.* 11, No.4, 818-822.
- Trebes, J. E., 1989, Generating holograms with a computer, *Photonics Spectra*, 433.)
- Urquhart, K.S., S.H. Lee, C.C. Guest, M. R. Feldman, H. Farhoosh, 1989, Computer aided design of computer generated holograms for electron beam fabrication, *Appl. Opt.* 28, 15.
- Vargady, L. O., 1964, Moiré fringes as visual position indicators, *Appl. Opt.*, 3, 631.
- Van Heerden, P.J., 1963, Associative holographic memories, *Appl. Opt.* 2, 393.
- Wyant, J. C., V.P. Bennett, 1972, Computer-generated hologram, null lens test of aspheric wavefronts, *Appl. Opt.* 13, 2833.

Yaroslavskii, L.P., N.S. Merzlyakov, 1980, Methods fo digital holography (translation of Metody tsifrovoi golografii por Parsons, Dave,), Plenum Publishing Corporation, New York, 171 pp.

Yatagai, T., 1976, Stereoscopic approach to 3-d display using computer generated holograms, Appl. Opt. 15, No.11, 2722.

Yatagai, T., 1988, Phase-only computer-generated hologram produced by an ion-exchange technique, Opt. Lett.,13, 11.)

Yatagai, T., 1983, Interpolation Approach to Computer-Generated, Holograms, Proceedings of the SPIE-"The International conference on Computer-Generated Holography, 1983 august 25 to 26, San Diego, CA, pp. 19.

Yatagai, T., J.G. Camacho-Basilio, H. Onda, 1989, Recording of computer generate holograms on an optical disk master, Appl. Opt. 28,6 1042.

---