



INAOE

**ELEMENTOS DIFRACTIVOS
RECONFIGURABLES EMPLEANDO
PANTALLAS DE CRISTAL LÍQUIDO**

Por

Luis Alfredo González López

Tesis sometida como requisito parcial para obtener el grado de **Doctor en Ciencias en la Especialidad de Óptica** en el Instituto Nacional de Astrofísica Óptica y Electrónica.

Supervisada por:

Dr. Victor Arrizón Peña.

Dr. Eduardo Tepichín Rodríguez

Tonantzintla, Pue, México.

June 13, 2001

©INAOE 2001

Derechos Reservados

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



Elementos difractivos reconfigurables empleando pantallas de cristal líquido.

Luis A. González López

June 13, 2001

A mi esposa Adriana.

A mi hija Andrea.

A mis Padres y hermanos.

A mi familia adoptiva (Fam. Riley)

Agradecimientos

A Dios por su especial bendición en mi vida.

Al Dr. Arrizón por su apoyo, gran estímulo y guía en mi formación como investigador.

Al Dr. Tepichín por su apoyo y valiosa participación como co-director de tesis.

Al Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica por brindarme una oportunidad de éxito en mi desarrollo académico.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por los apoyos económicos (Beca tesis 93956 y del proyecto 33053-E) recibidos durante mis estudios de doctorado.

A Gustavo Ramírez por su colaboración en el laboratorio.

Al Dr. Ariel Carrasco por su asesoría en el área de programación.

Al grupo de “óptica difractiva” y “ciencia de la imagen” por su apoyo.

A mis compañeros y amigos con los que compartimos momentos gratos.

A los Dres. Gonzalo Urcid (INAOE), Arturo Olivares (INAOE), Felix Aguilar (INAOE), Josué Alvarez (CICESE) y Gustavo Rodríguez (BUAP), por sus valiosas sugerencias en favor de enriquecer el contenido de esta tesis.

Finalmente, a todos los que de forma directa o indirecta me brindaron su apoyo.

Siglas empleadas en esta tesis

CCD Couple charged device.

EDO Elemento difractivo óptico.

EDP Elemento difractivo pixelizado.

LCD Liquid crystal display.

LP Lente pixelizada.

SA Simulated annealing.

SLM Spatial light modulator.

TN Twisted nematic.

SBP Spatial Band-width Product.

Resumen

Las pantallas de cristal líquido (LCDs de “*Liquid Crystal Displays*”) han sido ampliamente usadas en el procesamiento de información óptica por su programabilidad y capacidad de modular la luz en amplitud y/o fase. Nuestra propuesta en la presente tesis consiste en explorar las ventajas de los moduladores espaciales de luz (SLMs de “*Spatial Light Modulators*”) basados en LCDs eléctricamente direccionables para el diseño e implementación de elementos difractivos pixelizados (EDPs). En este contexto, se estudian las características de modulación de las LCDs tipo TN (“*Twisted Nematic*”). Además, se propone un novedoso método para la determinación de valores de fase igualmente espaciados en las LCDs, el cual, se basa en la optimización electro-óptica de rejillas tipo Blaze.

Por otro lado, también se presenta el análisis de las propiedades de los elementos difractivos pixelizados tales como las lentes pixelizadas, los generadores de arreglos de iluminación tipo Fourier espacialmente cuantizados, y una clase de elementos difractivos compuestos que hemos llamado elementos difractivos pixelizados autoenfocables. Los métodos para el diseño de tales elementos son presentados en detalle y se proponen algunas modificaciones a los procedimientos de diseño convencionales con el propósito de hacerlos ms adecuados para el diseño de EDPs. Particularmente, proponemos y demostramos las ventajas que representa el diseño directo de elementos difractivos restringidos por una simetría similar a la del patrón de difracción deseado. También se propone e implementa un sistema electro-óptico con un lazo cerrado de retroalimentación, construido alrededor de una LCD como elemento difractivo reconfigurable, para el diseño de arreglos de iluminación tipo Fourier. Adicionalmente, se estudia e

implementa un sistema lente-prisma para el barrido tridimensional de un haz.

La presente tesis se escribe como el propósito de apoyar en la futura investigación de nuevas aplicaciones de las LCDs en el ámbito de la optica difractiva dentro del INAOE.

Abstract

Programmable liquid crystal displays (LCDs) have been widely used in optical information processing, due to its capability to modulate the light in amplitude and/or phase. The proposal in the present thesis is to explore the advantages of programmable spatial light modulators (SLMs) based on an electrically addressable LCD for the design and implementation of pixelated diffractive elements. In this context, the modulation characteristics of the twisted nematic LCDs are investigated. Moreover, a procedure based in the electro-optical optimization of Blaze type gratings, is proposed to characterize equally-spaced phase values of the LCDs.

On the other hand, we analyze the properties of the pixelated diffractive elements such as the pixelated lenses, spatially quantized Fourier array generators, and a type of diffractive elements that we called self-focusing pixelated diffractive elements. We propose modifications to some conventional design methods in order to make them more appropriate for the design of the diffractive elements to be implemented in LCD-SLMs. Specifically, we demonstrate that the direct design of pixelated diffractive elements can be improved if they are constrained with a symmetry similar to that of the desired diffraction pattern. Furthermore, it is also proposed a closed loop electro-optical system, built around a LCD as a reconfigurable diffractive element, for the design of Fourier array illuminators. We also study and implement a reconfigurable prism-lens system to realize a 3-D beam scanning.

We hope this thesis be a support for the research of new applications of the LCDs in the diffractive optics field at the INAOE.

Contenido

1	Introducción.	10
2	Pantallas de cristal líquido como moduladores espaciales de luz en fase.	15
2.1	Introducción	16
2.2	Propiedades físicas de los cristales líquidos nemáticos	17
2.2.1	Cristales líquidos tipo TN	19
2.3	Implementación del modo mayormente en fase en una LCD tipo TN	21
2.3.1	Determinación del director molecular en una LCD.	23
2.4	Caracterización de niveles de fase igualmente espaciados en una LCD	30
2.4.1	Teoría básica.	31
2.4.2	Sistema electro-óptico.	32
2.4.3	Método de optimización.	33
2.4.4	Resultados experimentales.	37
2.5	Ejemplos ilustrativos.	38
2.6	Conclusiones	40
3	Lentes pixelizadas reconfigurables.	43
3.1	Introducción	44

3.2	Campo de Fresnel de un EDP	45
3.3	Descripción del campo focal de una LP	47
3.4	Diseño de LPs codificables en una LCD	53
3.4.1	Implementación experimental.	55
3.5	LPs con foco direccionable.	56
3.5.1	Aplicaciones e implementación experimental.	57
3.6	Conclusiones.	60
4	Diseño de elementos difractivos pixelizados tipo Fourier	62
4.1	Introducción	63
4.2	Arreglos de iluminación tipo Fourier espacialmente cuantizados.	64
4.3	Algoritmo de optimización	68
4.3.1	Restricciones por simetría	69
4.3.2	Algoritmo SA modificado.	71
4.4	Simulaciones y ejemplos ilustrativos.	75
4.5	Conclusiones.	78
5	Diseño electro-óptico de EDPs tipo Fourier	81
5.1	Introducción.	82
5.2	Generadores de arreglos de iluminación empleando una LCD.	83
5.3	Optimización electro-óptica.	85
5.3.1	Modificaciones en la distribución de fase de la LCD.	86
5.3.2	Medición y evaluación de la imagen reconstruída.	87
5.4	Ejemplos ilustrativos experimentales.	89
5.5	Conclusiones.	94

6 EDPs reconfigurables con propiedades de autoenfocamiento.	97
6.1 Introducción.	98
6.2 EDPs autoenfocables.	99
6.3 Ejemplos e implementación experimental.	101
6.4 Conclusiones.	111
7 Conclusiones generales.	112
7.1 Trabajo a futuro.	114
A Cristales uniaxiales.	115
B LCDs:Tabla de especificaciones.	117
B.1 Modelo Cyberdisplay 320	117
B.2 Modelo Cyberdisplay 640	118
C Función de transmitancia de un EDP (caso generalizado).	119
D Algoritmo modificado Fienup.	121
E Publicaciones: Artículos y trabajos presentados.	125

Capítulo 1

Introducción.

Los elementos difractivos ópticos (EDOs), son dispositivos que tienen la capacidad de transformar un frente de onda luminoso en un patrón de difracción que contiene una distribución de amplitud ó intensidad luminosa deseada. Considerando la teoría escalar de la difracción [1], los EDOs pueden ser diseñados para operar en el régimen de Fresnel o Fraunhofer.

Una distinción importante se encuentra entre los EDOs analógicos y los EDOs digitales [2]. Los EDOs analógicos, también llamados elementos ópticos holográficos (EOHs), son fabricados usando la interferencia de dos o más frentes de onda ópticos. Este tipo de elementos presentan una resolución alta y pueden codificarse en amplitud y fase.

Los EDOs digitales son fabricados con técnicas que emplean diseños asistidos por computadora. La fabricación de este tipo de elementos depende de la función que se desea codificar, la cual, puede ser compleja, solo de amplitud o solo de fase. Hasta el momento no existe técnica de fabricación alguna que

permita tener un buen control tanto de la fase y de la amplitud en un EDO digital.

La holografía generada por computadora, inventada por Brown y Lohmann en 1966 [3], es una técnica empleada para codificar frentes de onda arbitrarios en un medio de solo amplitud. Los elementos difractivos generados con esta técnica, comúnmente llamados “*hologramas generados por computadora*”, poseen valores de transmisión binaria en amplitud. Los inconvenientes en el empleo de estos elementos son su baja eficiencia de difracción y su baja razón señal a ruido.

En la actualidad muchos de los EDOs son fabricados como elementos con múltiples niveles de transmisión en amplitud y/o fase [4] presentando una alta eficiencia de difracción (teóricamente los EDOs de fase pueden alcanzar una eficiencia de difracción de hasta el 100%). En la práctica, la modulación de fase de un EDO puede ser implementada de forma continua ó discreta. Uno de los propósitos de este trabajo de tesis es describir las características y diseño de EDOs de fase discreta restringidos por una estructura pixelizada, a los cuales se les ha denominado “elementos difractivos pixelizados” (EDPs).

Diversos métodos para el diseño de elementos difractivos de fase han sido desarrollados [5-10]. J. N. Mait hace una distinción entre los métodos de diseño directo y los métodos de diseño indirecto [11]. Los métodos de diseño directo pretenden encontrar una solución directa al problema de diseño, sujetándose a las restricciones de fabricación. Por otro lado, los métodos de diseño indirecto buscan primeramente una solución al diseño sin considerar las restricciones de fabricación, para después imponer las restricciones de fabricación a la solución encontrada sin restricciones. En este sentido, además de describir un método para el diseño directo de EDPs, mostraremos las ventajas que representa el

diseño de EDPs sometidos a una simetría similar a la de su campo de reconstrucción.

Los EDPs pueden ser fácilmente fabricados con técnicas multinivel de baja resolución. Adicionalmente, el carácter de reconfigurabilidad puede ser adoptado por los EDPs cuando son codificados en moduladores espaciales de luz (SLMs del término en inglés “*Spatial light modulators*”). Por esta razón el estudio de los EDPs ha llegado a ser atractivo para muchos autores [12-22].

A pesar de la existencia de una gran variedad de SLMs [23-27], las pantallas de cristal líquido (LCDs del término en inglés “*liquid crystal displays*”) han tenido un gran uso en diferentes aplicaciones de la óptica difractiva entre las cuales destacan la interconexión óptica [28], correlación óptica [29] y holografía generada por computadora [30]. La razón de su gran uso se debe principalmente a las ventajas que ofrecen, entre las cuales podemos mencionar, su bajo precio y la posibilidad de ser controladas eléctricamente.

Particularmente, en esta tesis tenemos el propósito de presentar las ventajas que ofrece la programabilidad de las LCDs en la implementación de sistemas electro-ópticos con un lazo cerrado para el diseño de EDPs tipo Fourier. También se mostrará la realización experimental de un sistema prisma-lente para el barrido tridimensional de un haz.

En general nuestra propuesta consiste en explorar las ventajas que tienen las LCDs para la implementación de EDPs, la cual, es desarrollada en el trabajo de tesis cuyo contenido se describe a continuación.

Primeramente, en el Capítulo 2 se presenta el proceso de caracterización de un par de LCDs tipo TN como SLMs mayormente en fase. Específicamente, se describen las propiedades ópticas de los cristales líquidos nemáticos y su

variante el cristal líquido tipo TN. Además, se describe un procedimiento para obtener modulación mayormente en fase en estos dispositivos. También se presenta un método electro-óptico automatizado para determinar valores de fase igualmente espaciados en una LCD. Algunas implementaciones experimentales son presentadas a fin de demostrar la eficacia del proceso de caracterización. La caracterización final de cada LCD será considerada para las aplicaciones que se presentan en los capítulos subsecuentes.

En el Capítulo 3 se propone el empleo de una LCD para la implementación de lentes pixelizadas (LPs) reconfigurables. De manera que, una descripción del campo focal y de las propiedades de las LPs es presentada. Conociendo estas propiedades se diseñan LPs para su codificación en una LCD. Mediante la reconfigurabilidad de una LCD se implementa un dispositivo focalizador direccionable (prisma-lente) basado en la codificación dinámica de LPs. Una aplicación adicional en este contexto se presenta implementando un dispositivo que genera arreglos de lentes con focos direccionables.

El diseño directo de EDPs tipo Fourier es presentado en el Capítulo 4. La intención de este capítulo es mostrar un procedimiento para el diseño de EDPs que generan arreglos de iluminación tipo Fourier empleando el algoritmo “*templado simulado*” (traducción adoptada del inglés “*simulated annealing*”). Además se demuestra, mediante varios ejemplos, las ventajas que representa el diseño directo de EDPs cuando son restringidos por una simetría similar a la de su campo de reconstrucción frente a los EDPs diseñados de manera convencional.

Algunos diseños de EDPs tipo Fourier son implementados con una LCD como se presenta en el Capítulo 5. Sin embargo, el campo de reconstrucción ex-

perimental de estos diseños presentan algunas deficiencias como resultado de las imperfecciones presentes en el modulador empleado. Una mejor reconstrucción podría obtenerse al considerar tales imperfecciones durante el proceso de diseño. Por esta razón en este capítulo se propone y se implementa el diseño de EDPs tipo Fourier mediante un sistema electro-óptico retroalimentado (computadora - LCD - Lente transformadora - CCD - computadora). El desempeño experimental de los EDPs diseñados con este método electro-óptico es comparado con el de aquellos obtenidos mediante simulación computacional.

El diseño de EDPs reconfigurables con propiedades de autoenfocamiento se presenta en el Capítulo 6. El principio de diseño de este tipo de elementos se basa en la codificación conjunta de una LP con un EDP tipo Fourier. Una comparación en el desempeño de estos EDPs con aquellos implementados en un sistema convencional que emplea una lente transformadora se presenta mediante varios ejemplos.

Finalmente, en el Capítulo 7 se presentan las conclusiones generales correspondientes a este trabajo de tesis.

Capítulo 2

Pantallas de cristal líquido como moduladores espaciales de luz en fase.

Se describe un procedimiento para caracterizar y establecer el modo de modulación mayormente en fase en un par de LCDs tipo TN. Además se presenta un método automatizado para determinar valores de fase igualmente espaciados en una LCD. Este método se basa en la optimización electro-óptica de rejillas tipo Blaze multinivel. La comprobación experimental del proceso de caracterización es realizada mediante la codificación de algunos elementos de fase.

2.1 Introducción

Por sus propiedades ópticas, las LCDs han llegado a ser muy empleadas como SLMs en una gran variedad de aplicaciones correspondientes al área del procesamiento de información óptica [31].

En la actualidad existe una gran variedad de materiales para construir LCDs [32]. Sin embargo, las LCDs tipo TN son las que comercialmente se encuentran más disponibles. Aunque este tipo de dispositivos ha sido diseñado para modular la luz en amplitud, se ha demostrado que tienen también la capacidad de modular la luz en fase [33]. En la práctica, las LCDs tipo TN presentan una modulación conjunta entre amplitud y fase. A pesar de este inconveniente, es posible establecer ciertos parámetros para obtener, ya bien sea, modulación mayormente en amplitud ó mayormente en fase.

Específicamente, en este Capítulo se presenta un procedimiento para caracterizar un par de LCDs, ambas fabricadas por la corporación Kopin, en su modo de modulación mayormente en fase, las cuales, serán empleadas para la codificación de elementos difractivos de fase. Para comprender la manera de operar de estos dispositivos, la sección 2.2 describe las propiedades físicas de los cristales líquidos nemáticos y su variante, el cristal líquido tipo TN. Los parámetros y un procedimiento para definir el modo de operación de una LCD tipo TN son descritos en la sección 2.3.

Diversas técnicas para medir la respuesta en fase de una LCD han sido reportadas en la literatura [34-39]. Algunas de estas técnicas emplean sistemas interferométricos que son difíciles de implementar, puesto que presentan una alta sensibilidad a perturbaciones ambientales. Otros métodos emplean la difracción

de Fraunhofer eliminando el requerimiento de un haz de referencia. Sin embargo, tales métodos presentan una ambigüedad en el cálculo entre fases complementarias ϕ y $2\pi - \phi$. Particularmente, proponemos un método automatizado para obtener directamente valores de fase igualmente espaciados en una LCD. Este novedoso método, que se explica en detalle en la sección 2.4, consiste en la optimización de rejillas tipo Blaze codificadas en una LCD incluida en un sistema electro-óptico con retroalimentación. Aunque este método emplea la difracción de Fraunhofer, no presenta ambigüedad en el cálculo entre las fases complementarias ϕ y $2\pi - \phi$. La sección 2.5 presenta algunos ejemplos experimentales ilustrativos que comprueban la caracterización en fase de ambas LCDs. Finalmente, en la sección 2.6 se presentan las conclusiones correspondientes a este capítulo.

2.2 Propiedades físicas de los cristales líquidos nemáticos

Los cristales líquidos nemáticos son materiales anisotrópicos que presentan una fase intermedia entre los estados sólido y líquido con moléculas elongadas en una dirección y posición desordenada. Este orden de orientación da a los cristales líquidos nemáticos las propiedades ópticas de los cristales uniaxiales (cuya operación óptica se describe en el Apéndice A). A la dirección de las moléculas se le conoce como el director molecular del cristal líquido e indica la dirección del eje óptico. La orientación del director molecular es arbitraria en el espacio; sin embargo en la práctica es impuesta por fuerzas tales como los efectos directrices de las capas de alineación en las paredes contenedoras de

una celda. La luz que se propaga a través de tal líquido con polarización paralela a la dirección molecular encuentra un índice de refracción extraordinario, pero si la polarización de la luz entrante es perpendicular a la dirección molecular, se encuentra con un índice refractivo diferente llamado índice de refracción ordinario.

Las propiedades ópticas excepcionales de los cristales líquidos nemáticos han permitido su empleo como dispositivos cuyo índice de refracción puede controlarse eléctricamente [40]. Los dispositivos de este tipo son construídos llenando el espacio intermedio entre dos placas de vidrio paralelas con el material de cristal líquido nemático (ver Fig. 2.1).

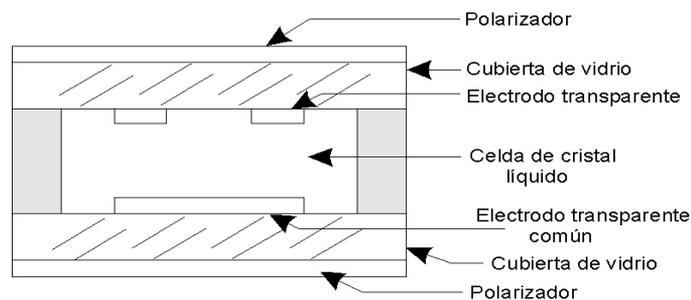


Figura 2.1: Estructura de una celda de cristal líquido.

En el interior las dos placas de vidrio también cubren a electrodos transparentes a manera que el dispositivo pueda ser controlado eléctricamente. Las superficies internas de la celda de cristal líquido son pulidas con una orientación tal que las moléculas se alinean por sí mismas con las superficies y paralelas unas con otras.

El ángulo de inclinación de las moléculas, como se ilustra en la Fig. 2.2, depende de la fuerza del campo eléctrico aplicado y la distancia de las moléculas

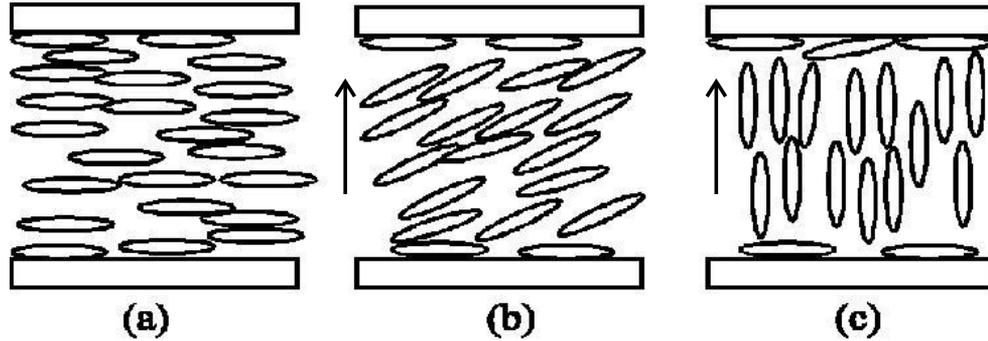


Figura 2.2: Orientación de las moléculas en un dispositivo de cristal líquido: (a) en equilibrio sin campo aplicado, (b) con un campo ligeramente mas grande que el campo crítico, (c) en equilibrio con un campo suficientemente fuerte.

a la superficie. Cuando no hay campo eléctrico aplicado, la organización de equilibrio se presenta y las moléculas están paralelas a las superficies de la celda, esto se muestra en la Fig. 2.2(a). Cuando un campo eléctrico con cierta intensidad (campo crítico) es aplicado, las moléculas lejanas a la superficie comienzan a inclinarse e intentan alinearse en la dirección del campo aplicado, como puede verse en la Fig. 2.2(b). Si el campo aplicado llega a ser lo suficientemente fuerte (usualmente muchas veces más fuerte que el campo crítico) todas las moléculas se inclinan a 90° , es decir, normal a las superficies de la LCD, excepto aquellas que tocan a las superficies (ver Fig. 2.2(c)).

2.2.1 Cristales líquidos tipo TN

En los cristales líquidos tipo TN la orientación de las capas de alineación se presentan a diferentes ángulos. Esta separación angular (ángulo de torcimiento) causa un cambio continuo en la orientación de las moléculas de cristal líquido entre las dos placas [41]. Si un haz de luz se propaga através de

tal dispositivo, la polarización del haz seguirá la dirección del director molecular como si fuera una espiral (véase la Fig. 2.3), de tal modo que el dispositivo actúa como un rotador de polarización.

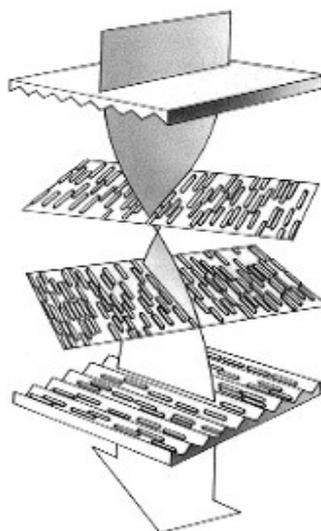


Figura 2.3: Rotación de la dirección molecular en un cristal líquido tipo TN.

Debido a que el ángulo efectivo de rotación de polarización varía con el campo eléctrico aplicado, el control de la amplitud de un haz de luz se puede realizar insertando la celda de cristal líquido entre dos polarizadores. En la Fig. 2.4, el ángulo de torcimiento de la celda de cristal líquido es de 90° , y el polarizador y analizador están orientados perpendicularmente uno al otro. Si no se aplica campo eléctrico al dispositivo, se obtiene el haz de luz máximo en la salida. Si un campo eléctrico es aplicado a la celda, las moléculas se inclinan y el ángulo efectivo de rotación varía al igual que lo hace la amplitud del haz de luz de salida. Si el campo eléctrico aplicado es lo suficientemente fuerte, todas las moléculas tienden a alinearse a 90° , y la polarización de la luz de salida

no rota. Como la orientación del analizador es perpendicular a la de la luz de salida, se obtiene el mínimo de luz transmitida.

Nótese que la rotación de polarización y la modulación en amplitud resultante ocurre para luz entrante polarizada linealmente paralela u ortogonal al director molecular del cristal líquido.

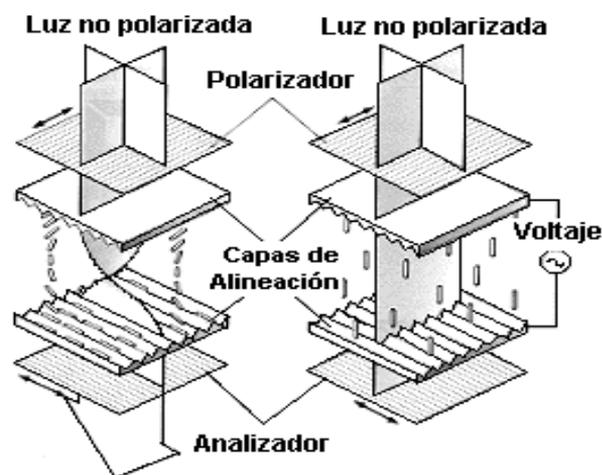


Figura 2.4: Control de la amplitud de un haz de luz con una celda de cristal líquido tipo TN.

2.3 Implementación del modo mayormente en fase en una LCD tipo TN

Los dispositivos direccionables más comunes de cristal líquido son las LCDs tipo TN; en donde uno de los dos electrodos transparentes es colocado en la forma de un arreglo de pixeles, tal que, cada uno de los pixeles sea direccionado eléctricamente de forma individual.

Algunas de las ventajas de las LCDs tipo TN para ser empleadas como

SLMs son las siguientes:

- (1) Son mucho más baratas que otros dispositivos moduladores de luz.
- (2) Pueden ser reconfigurables tanto en forma eléctrica como en forma óptica.
- (3) A diferencia de otros moduladores, tales como los dispositivos magneto-ópticos que actúan como dispositivos binarios o ternarios [42], las LCDs pueden ser reconfiguradas para producir un gran número de niveles de fase.

Las LCDs tipo TN son comúnmente diseñadas para trabajar en el modo de amplitud; de manera que la mayoría de estas no poseen buenas características para modular la luz en fase. En la literatura se han reportado diversos procedimientos para compensar algunos de los defectos que presentan estos dispositivos [43-45].

Las características de las LCDs pueden variar inclusive procediendo de la misma serie y modelo. Consecuentemente cada LCD es única y los parámetros requeridos para lograr algún modo de operación deseado deben determinarse de forma particular.

Al aplicarse un haz luminoso linealmente polarizado con orientación paralela al director molecular de una LCD tipo TN su orientación cambia en 90° . Si además, aplicamos un campo eléctrico en forma variable, es posible cambiar el índice de refracción en el material de extraordinario a ordinario así como también la orientación de polarización del haz de salida hasta alinearse con la orientación de entrada. En consecuencia, la fase de la onda propagada en este sentido es modulada de forma significativa [46]. Si la polarización del haz luminoso entrante es ortogonal al director molecular, la onda de propagación ve un índice de refracción cercano al ordinario para todos los valores de inclinación de las

moléculas, por lo que, la variación en la modulación en fase resulta ser muy pequeña.

El simple hecho de orientar la polarización del haz luminoso de entrada paralelo u ortogonal al director molecular permite al dispositivo operarlo en el modo mayormente en fase ó mayormente en amplitud, respectivamente. Para determinar el modo de modulación mayormente en fase en una LCD tipo TN es entonces de suma importancia la estimación de la orientación del director molecular. Tal orientación es encontrada usando el procedimiento que se describe a continuación.

2.3.1 Determinación del director molecular en una LCD.

Las especificaciones técnicas de las LCDs que se emplean en este trabajo de tesis, ambas fabricadas por la corporación Kopin, son presentadas en el Apéndice B. Los polarizadores originales de cada LCD fueron removidos y reemplazados por unos de mejor calidad. Adicionalmente, se ajustaron los controles de brillo y contraste en cada LCD para minimizar el nivel de voltaje dc de referencia y así obtener una mayor variación de modulación. Cada LCD es direccionada mediante una tarjeta de video que soporta el modo VGA, proveyendo 256 valores de voltaje cuantizado, los cuales comúnmente son identificados como “niveles de gris”. Para efectos de facilitar la identificación de cada LCD nombraremos Kopin 640 a la que posee 640×480 pixeles y Kopin 320 a la que posee 320×240 pixeles.

El método que empleamos para determinar la orientación de los ejes extraordinario y ordinario en cada LCD, propuesto por Kirsch et al [34], es experimentalmente simple (ver Fig. 2.5). En este método el estado de polar-

ización de la luz transmitida por la LCD es usado para estimar la orientación de los ejes en el cristal líquido. Al hacer pasar luz linealmente polarizada a diferentes orientaciones a través de la LCD (sin aplicar voltaje alguno), un analizador colocado en la salida es rotado en un intento de obtener un nulo. Tal nulo se presenta cuando la orientación de la luz linealmente polarizada incidente es paralela ó perpendicular al eje extraordinario. En este caso, la luz de salida tendrá una polarización lineal, la cual puede ser nulificada al cruzar el analizador. Si la luz linealmente polarizada entrante tiene diferente orientación se partirá en la superficie del cristal viajando una parte a lo largo del eje ordinario, y la otra a lo largo del eje extraordinario. De tal modo que, la luz de salida tendrá una polarización de una forma distinta a la lineal.

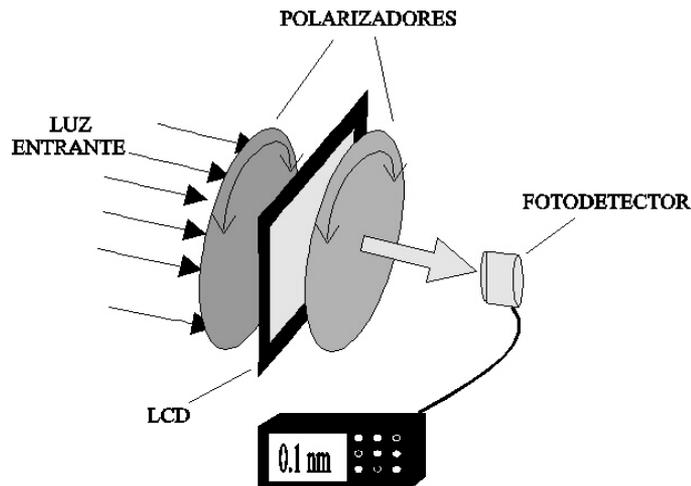


Figura 2.5: Sistema experimental para encontrar los nulos en intensidad en una LCD tipo TN, los cuales indican las orientaciones de los ejes extraordinario y ordinario.

Los nulos encontrados (experimentalmente) en la intensidad transmitida, para luz linealmente polarizada incidente (con longitud de onda de 632.8 nm) en la parte frontal de la LCD Kopin 640, fueron a 69 y 159 grados con respecto a la

vertical, y para la LCD Kopin 320 fué de 41 y 131 grados con respecto a la vertical. Estas mediciones se realizaron bajo las mismas condiciones experimentales obteniéndose una incertidumbre de ± 3 grados. La desventaja de este método es que no nos permite distinguir entre la orientación del eje extraordinario, que corresponde al director molecular, y la orientación del eje ordinario; ya que en ambos casos obtenemos luz linealmente polarizada.

Como es sabido, el máximo rango dinámico de la modulación de fase en una LCD ocurre cuando hacemos incidir luz linealmente polarizada paralela al director molecular ó eje extraordinario. Para determinar tal orientación empleamos un método basado en las propiedades de una rejilla de fase binaria. Debido a que no es posible codificar solo fase en una LCD tipo TN, consideremos una rejilla binaria con una transmitancia compleja [$T_n = t_n \exp(i\phi_n)$] y razón de abertura w/d (donde w corresponde al ancho de cada franja en la rejilla y d a la distancia entre franjas), como se representa gráficamente en la Fig.2.6. La intensidad en los órdenes de difracción para tal rejilla pueden calcularse como

$$I_m = \left(\frac{w}{d}\right)^2 \text{sinc}^2\left(\frac{wm}{d}\right) [t_1^2 + t_2^2 + 2t_1t_2(-1)^m \cos \phi], \quad (2.1)$$

donde t_1 y t_2 corresponden a las transmitancias en amplitud en las franjas que componen el periodo fundamental de la rejilla y ϕ al escalón de fase entre franjas.

En general, la intensidad del orden cero de difracción, I_0 , para una rejilla de fase binaria (es decir para cuando $t_1 = t_2 = 1$) se comporta de la forma como se muestra en la Fig.2.7(a) cuando el escalón de fase ϕ entre franjas es cambiado de forma dinámica. Nótese que I_0 decae a medida que ϕ se acerca a π , cuando $\phi = \pi$ entonces $I_0 = 0$ y finalmente I_0 crece nuevamente en la medida que ϕ se acerca a 2π .

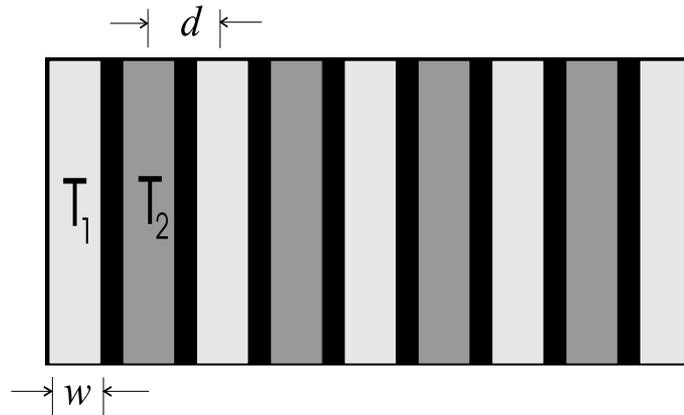


Figura 2.6: Representación gráfica de una rejilla binaria con transmitancia compleja.

Basado en esta propiedad de una rejilla de fase binaria desarrollamos un método para determinar la orientación del eje extraordinario, el cual consiste en observar y medir la variación en intensidad del orden cero de difracción de una rejilla binaria dinámica codificada en una LCD. El período fundamental de esta rejilla se compone de una franja con nivel de gris cero y otra con nivel de gris variable. La LCD debe ser iluminada con luz linealmente polarizada con una orientación paralela a alguna de las orientaciones de los nulos en intensidad encontrados mediante el método de Kirsch. Dependiendo de la orientación de luz entrante seleccionada, la posición del analizador es ajustada de modo que la intensidad transmitida para el nivel de gris cero sea la misma que la obtenida con el nivel de gris 255. De esta manera podemos minimizar la variación en la modulación de amplitud presente en la LCD.

De acuerdo al comportamiento observado en la intensidad del orden cero de difracción de la rejilla dinámica, es posible determinar en que orientación de luz linealmente polarizada entrante obtenemos el mayor rango dinámico de fase y por consiguiente la orientación del director molecular.

Aplicando el método antes descrito, en la Fig. 2.7(b) se presentan curvas experimentales del comportamiento en la intensidad del orden cero de difracción con respecto a los niveles de gris de una rejilla binaria dinámica codificada en la LCD Kopin 640, la cual, fué iluminada con luz linealmente polarizada tanto en 69 como en 159 grados (orientaciones correspondientes a los nulos encontrados para esta LCD). De estas curvas experimentales podemos observar que la máxima variación de fase y por lo consiguiente la orientación del eje extraordinario ocurre al hacer incidir luz linealmente polarizada a 69 grados. Empleando también este procedimiento experimental para la LCD Kopin 320 encontramos que la orientación de su eje extraordinario está a 41 grados. De acuerdo al procedimiento antes descrito y empleando luz linealmente polarizada paralela a eje director, la variación de transmitancia en amplitud minimizada resultante se obtuvo mediante una configuración polarizador/analizador de $69^\circ/21^\circ$ para la Kopin 640 y $41^\circ/266^\circ$ para la Kopin 320 (ver Fig. 2.8).

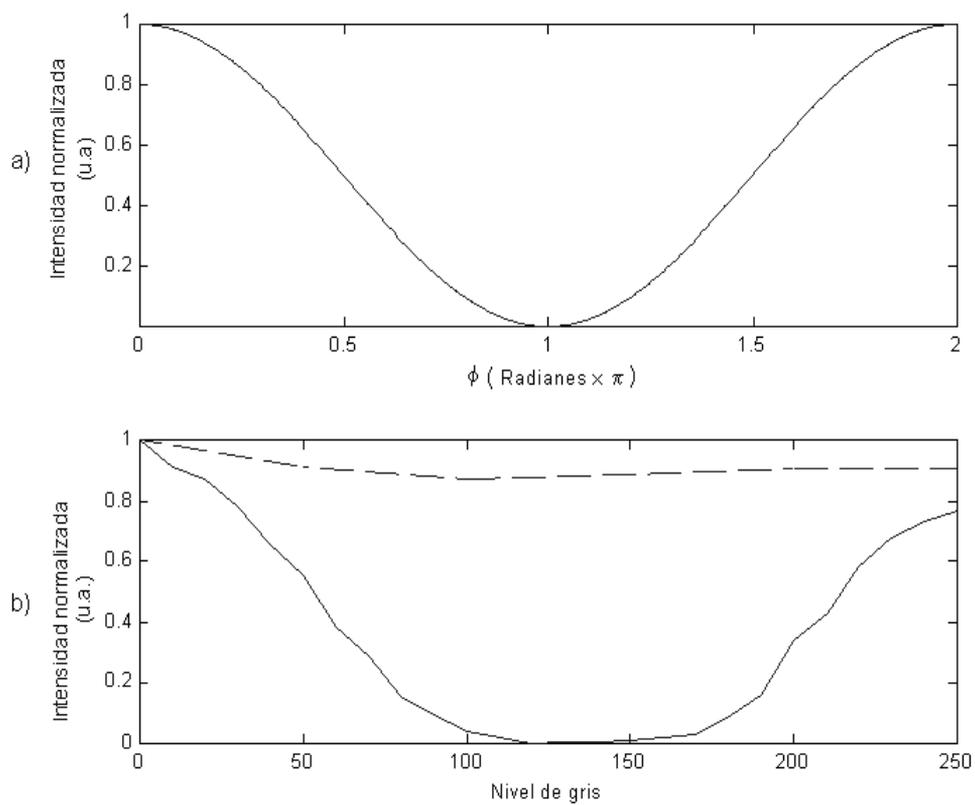


Figura 2.7: Comportamiento del orden cero de difracción: a) para una rejilla de fase binaria dinámica (simulación numérica), b) para una rejilla binaria codificada en la LCD Kopin 640 con transmitancia de amplitud minimizada, iluminada tanto con luz linealmente polarizada a 69 grados (curva continua), así como con luz linealmente polarizada a 159 grados (curva segmentada).

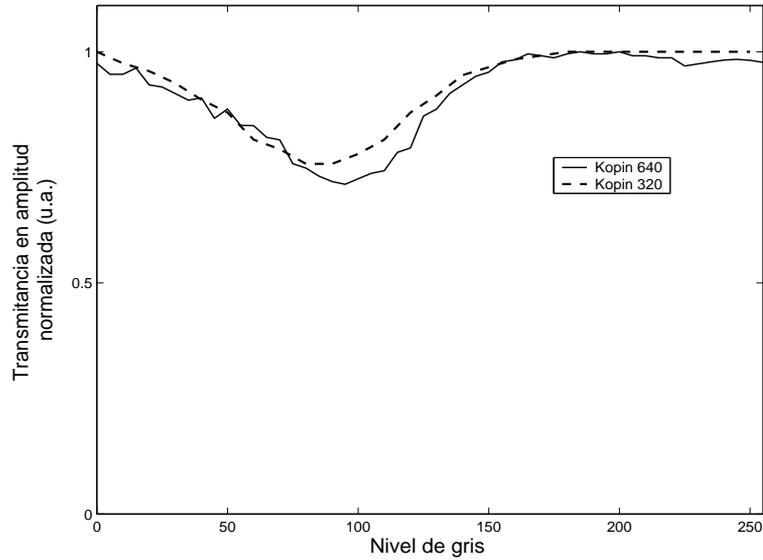


Figura 2.8: Transmitancia en amplitud para la LCD Kopin 640 y Kopin 320.

Para estimar la modulación de fase obtenida en una LCD, Zhang et al [38] reportaron un método de caracterización que también se basa en el despliegue de una rejilla de fase binaria en una LCD. En este método se establece una visibilidad de intensidad entre el orden cero (I_0) y uno (I_1) de difracción, la cual se calcula como

$$r = (I_0 - I_1)/(I_0 + I_1), \quad (2.2)$$

en donde I_0 e I_1 pueden expresarse a partir de la Ec.(2.1). De modo que al sustituir las expresiones para I_0 e I_1 en (2.2) y mediante algunas operaciones algebraicas, el cálculo de la modulación de fase obtenida puede realizarse con

$$\phi = \cos^{-1} \left[L \frac{(r + rk - 1 + k)}{(r - rk - k + 1)} \right], \quad (2.3)$$

donde,

$$L = -(t_1^2 + t_2^2)/t_1 t_2, \quad (2.4)$$

y

$$k = \text{sinc}^2(w/d). \quad (2.5)$$

Particularmente, empleamos este método para estimar mediante la Ec.(2.3) la máxima modulación de fase en cada LCD, desplegando una rejilla binaria con niveles de gris (0,255). La medición experimental en la intensidad de los órdenes de difracción cero y uno para esta rejilla fué hecha de forma simultánea con un par de fotodetectores (Modelo Si 13PDH 001 de Melles Griot). Estas mediciones fueron empleadas para calcular r y de forma indirecta estimar el valor de ϕ . De manera que, la máxima modulación obtenida para la LCD Kopin 640 y 320 fué de $(1.865 \pm 0.043)\pi$ y $(1.748 \pm 0.037)\pi$, respectivamente.

2.4 Caracterización de niveles de fase igualmente espaciados en una LCD

Con el propósito de conocer los valores de fase igualmente espaciados que nos proporciona una LCD para la codificación de EDOs de fase, desarrollamos un novedoso método basado en la optimización electro-óptica de rejillas tipo Blaze desplegadas en tiempo real en una LCD. La base teórica en que se fundamenta este método se describe a continuación.

2.4.1 Teoría básica.

La expresión matemática correspondiente a las amplitudes complejas de los órdenes de difracción de una rejilla multinivel, cuya estructura se ilustra en la Fig. 2.9, se escribe como

$$A_m = \frac{a}{d} \text{sinc} \left[m \frac{a}{d} \right] \sum_{n=0}^{N-1} t_n \exp(i\phi_n) \exp[-i2\pi mn/N], \quad (2.6)$$

donde $t_n \exp[i\phi_n]$ es la transmitancia compleja del pixel n -ésimo en la celda básica de la rejilla (t_n y ϕ_n corresponden a la distribución de transmitancia en amplitud y distribución de fase de la rejilla, respectivamente).

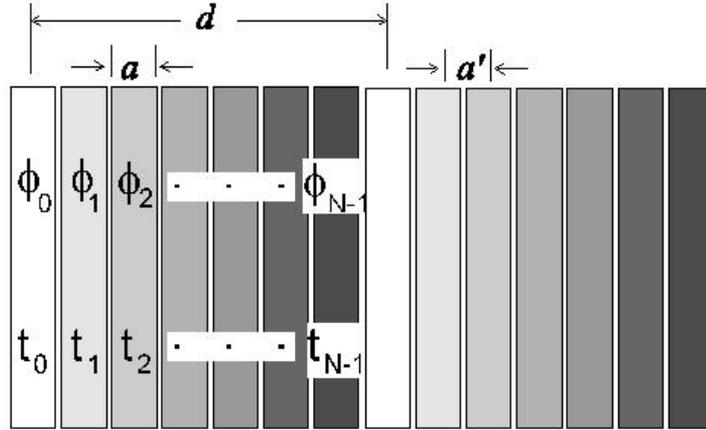


Figura 2.9: Representación gráfica de una rejilla multinivel con transmitancia compleja.

Para el orden uno de difracción, es decir $m = 1$, tenemos que

$$A_1 = \frac{a}{d} \text{sinc} \left[\frac{a}{d} \right] \sum_{n=0}^{N-1} t_n \exp(i\phi_n) \exp[-i2\pi n/N]. \quad (2.7)$$

Puesto que $t_n > 0$, de la Ec.(2.7) podemos notar que A_1 es máximo cuando $\phi_n = 2\pi n/N$. De modo que ϕ_n en este caso presenta valores de fase igualmente espaciados correspondientes a la distribución de fase de una rejilla tipo Blaze. Basados en esta teoría fuimos motivados a desarrollar un método de búsqueda cuyo propósito es el de optimizar, con un sistema electro-óptico, la configuración de una rejilla de fase codificada en una LCD, con el objetivo de concentrar la máxima intensidad en el orden uno de difracción. La descripción de este método electro-óptico se presenta a continuación.

2.4.2 Sistema electro-óptico.

Un esquema del sistema electro-óptico empleado es presentado en la Fig. 2.10, en donde, una fuente de luz laser He-Ne ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$) es expandida y colimada iluminando así a la LCD. Una lente transformadora de longitud focal de 20 cms. es colocada al frente de la LCD. El dispositivo empleado para medir las variaciones en intensidad en el plano del patrón de difracción es una cámara CCD (del acrónimo en inglés "*Charged Couple Device*"). Debido a que la intensidad del patrón de difracción a medir tiene pequeñas fluctuaciones, por efectos de la frecuencia de barrido en la LCD (y fluctuaciones en la propia fuente laser), en este procedimiento tomamos el valor promedio de 6 lecturas por cada iteración. La evaluación y las modificaciones en la rejilla de fase codificada se realizan con una computadora (PC compatible a 200 Mhz) a partir de la retroalimentación de los datos obtenidos con la CCD. Empleando el sistema electro-óptico antes descrito hemos desarrollado el método de optimización (de búsqueda directa) para encontrar niveles de fase igualmente espaciados como se describe a continuación.

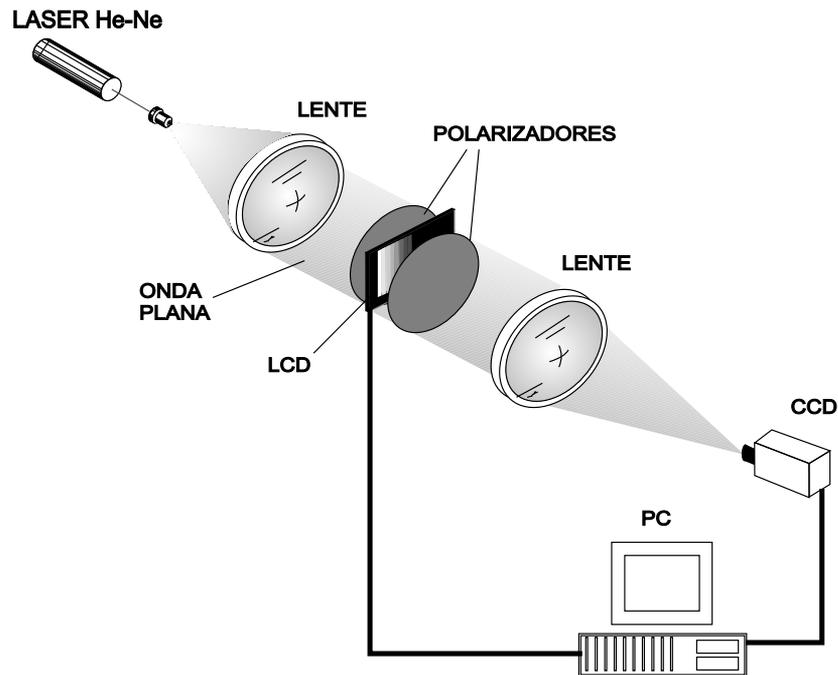


Figura 2.10: Sistema electro-óptico automatizado para la caracterización de valores de fase igualmente espaciados en una LCD.

2.4.3 Método de optimización.

En la etapa inicial del procedimiento de optimización se buscan los valores de gris, proporcionados por la tarjeta de video, asociados a una rejilla de fase binaria ($0, \pi$). Los valores de fase correspondientes a tal rejilla se obtienen cuando el orden de difracción cero es mínimo o nulo, como se ilustró gráficamente en la Fig 2.7. Este es el único caso en que el procedimiento electro-óptico es empleado minimizando la intensidad del orden cero de difracción.

En la segunda etapa del proceso de optimización se buscan los valores de gris correspondientes a una rejilla de 4 niveles de fase igualmente espaciados. Al inicio de esta etapa consideramos como valores iniciales aquellos valores de gris

obtenidos del proceso de optimización de la rejilla $(0, \pi)$ y valores intermedios calculados mediante una interpolación entre los valores de gris asociados a los valores de fase $0, \pi$ y el valor máximo de gris (en este caso 255). En general, los valores de gris (correspondientes a valores de fase igualmente espaciados) obtenidos en cada etapa de optimización y valores de gris interpolados son usados para iniciar la etapa siguiente, en la que se optimizará una rejilla tipo Blaze con el doble de píxeles en su celda básica.

El algoritmo de optimización empleado consiste en los siguientes pasos:

1. En la LCD se despliega un rejilla con valores de fase iniciales, ϕ_{ini} , establecidos de la manera en que se describió anteriormente.
2. Se localiza el área donde se ubica el orden uno de difracción de la rejilla desplegada en la LCD.
3. Se captura la intensidad del orden uno de difracción de la rejilla inicial (I_{ini}) con la CCD y su valor promedio se guarda en memoria.
4. Se selecciona un píxel de la estructura básica de la rejilla inicial y su valor de gris es aumentado o disminuído en uno. La estructura básica de la rejilla con nueva distribución de fase es replicada hasta formar una nueva rejilla codificada en la LCD. La forma de seleccionar los píxeles a modificar se hace primeramente recorriendo, en un 80% del número total de iteraciones, aquellos píxeles cuyos valores iniciales fueron calculados de forma interpolada. El proceso total se completa haciendo un ajuste a la distribución de fase completa en la celda básica de la rejilla en el número de iteraciones restante.
5. Al obtenerse la nueva distribución de fase de la rejilla (ϕ_{modif}), la intensidad del orden uno de difracción (I_{modif}) es integrada y su valor se guarda en memoria.

6. Si $I_{modif} > I_{ini}$ entonces $\phi_{ini} = \phi_{modif}$ y $I_{ini} = I_{modif}$. De lo contrario, se restablece la rejilla de fase anterior.

7. Los pasos 4 al 6 se repiten iterativamente.

El proceso acomoda en forma automática la configuración necesaria para obtener los valores de fase igualmente espaciados y concluye cuando el número total de iteraciones ha llegado a su término.

La fig. 2.11. nos muestra de manera general un diagrama a bloques de este método electro-óptico iterativo de caracterización.

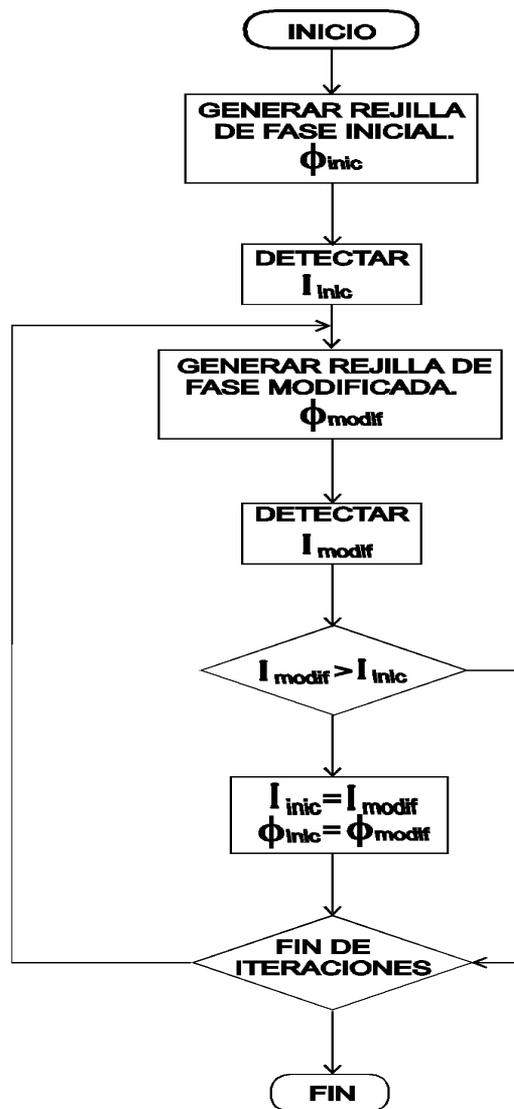


Figura 2.11: Diagrama de flujo del proceso de optimización electro-óptica para la obtención de valores de fase igualmente espaciados en una LCD.

2.4.4 Resultados experimentales.

Las LCDs Kopin 640 y 320 fueron sometidas al proceso de optimización electro-óptico. De acuerdo a la máxima modulación alcanzada por cada LCD se evaluaron 16 niveles de fase para la Kopin 640 y 8 niveles de fase para la Kopin 320. Una gráfica que indica los valores de fase resultantes de cada LCD, asociados a valores de grises provistos por la computadora, se muestran en la Fig 2.12. Como podemos observar, la variación de fase con respecto al voltaje aplicado (nivel de gris) no es lineal. Sin embargo, una vez que se conocen los niveles de fase y su relación con los niveles de gris provistos por la tarjeta de video de la computadora, es posible codificar elementos de fase como los que se muestran en la siguiente sección que comprueba nuestra caracterización.

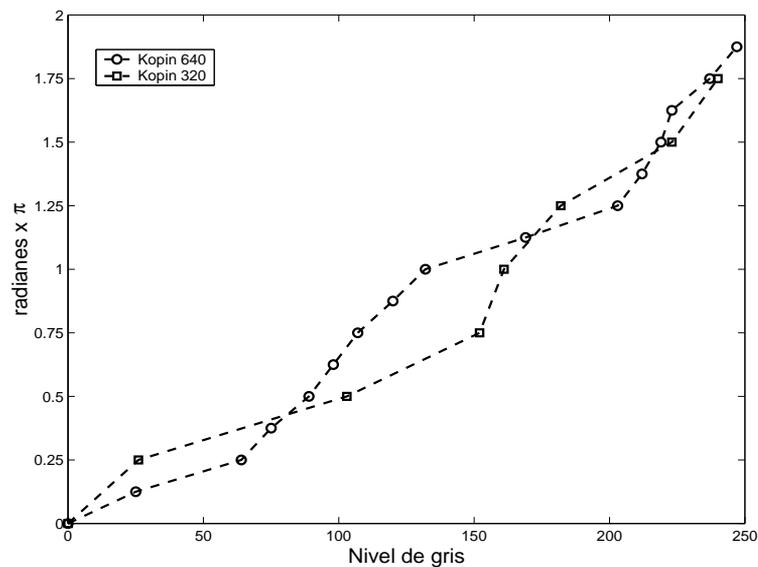


Figura 2.12: Valores de fase igualmente espaciados en la LCD Kopin 640 (16 niveles) y Kopin 320 (8 niveles) como resultado del proceso de optimización electro-óptica de rejillas tipo Blaze empleando $\lambda = 632.8 \text{ nm}$.

2.5 Ejemplos ilustrativos.

Como primera prueba de la caracterización resultante para la LCD Kopin 320, se desplegó una rejilla tipo Blaze de 8 niveles de fase. La Fig. 2.13 muestra gráficamente la distribución de intensidades experimental en varios órdenes de difracción en el plano de Fourier de tal rejilla. La eficiencia de difracción esperada, la cual es calculada numéricamente como la razón de la potencia lumínica en el orden uno de difracción con la potencia total transmitida por la rejilla, es de 61.6%. Este valor de eficiencia fué calculado considerando la estructura pixelizada bidimensional de la LCD y su transmitancia en amplitud. Por otro lado, experimentalmente se obtuvo una eficiencia de difracción del 60%, la cual es muy cercana a la esperada (considérese que la medición de la potencia transmitida por la rejilla fué realizada después del analizador).

Un ejemplo adicional para comprobar la efectividad del proceso de caracterización de la LCD Kopin 640, es la implementación de un filtro de fase reconfigurable [48] para realizar la transformada fraccional de Hilbert.

La operación unidimensional de filtraje espacial con la transformada fraccional de Hilbert es usual en el procesamiento de imágenes debido a que puede enfatizar selectivamente los bordes en la imagen de un objeto binario [49-51]. La función de fase de un filtro de Hilbert de orden P se define como

$$F(u) = \exp(iP\pi/2)S(u) + \exp(-iP\pi/2)S(-u), \quad (2.8)$$

donde $S(u)$ representa la función escalón y el parámetro P representa el orden fraccional de la transformada de Hilbert. Este filtro fué codificado desplegando de forma dinámica la mitad de la LCD con el valor correspondiente al nivel de

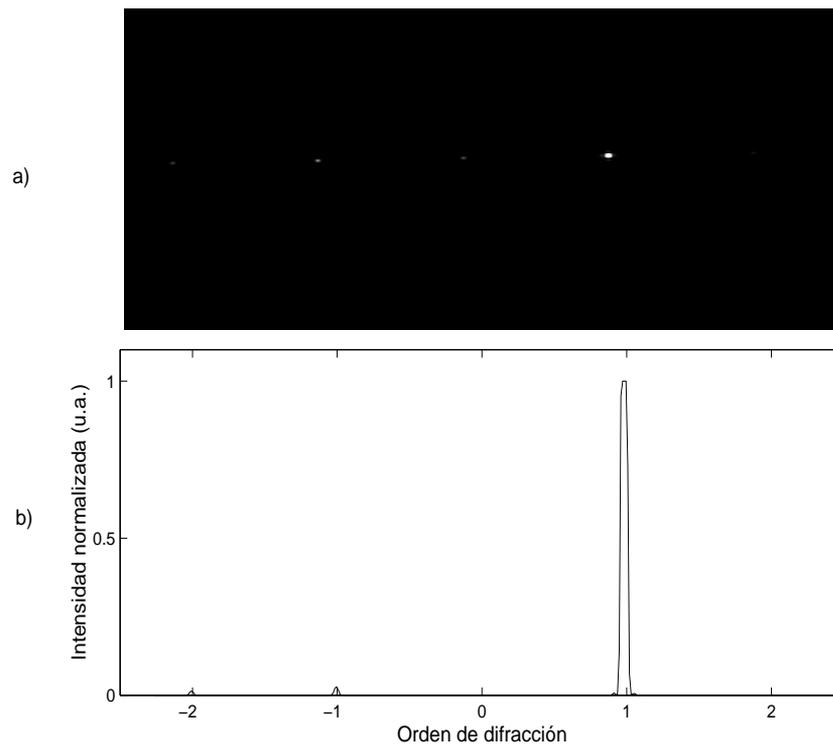


Figura 2.13: Distribución de intensidades en los órdenes de difracción para una rejilla tipo Blaze de 8 niveles de fase codificada en la LCD Kopin 320: a) imagen obtenida con la CCD y b) barrido a través de cada orden

fase 0 y la otra mitad con valores correspondientes a 0 , $\pi/2$, π y $3\pi/2$; es decir, $P = 0, 0.5, 1$ y 1.5 .

Empleando este filtro dinámico de Hilbert se pudo controlar el realce de bordes en la imagen de un objeto binario de entrada. Primero, se enfatizaron los bordes sobre el lado derecho de la imagen (con $P = 0.5$), después ambos bordes (con $P = 1$), y finalmente los bordes sobre la izquierda de la imagen (con $P = 1.5$).

Los resultados experimentales obtenidos concuerdan satisfactoriamente

con aquellos obtenidos en [50] para el objeto cuya imagen se ilustra en la Fig. 2.14.

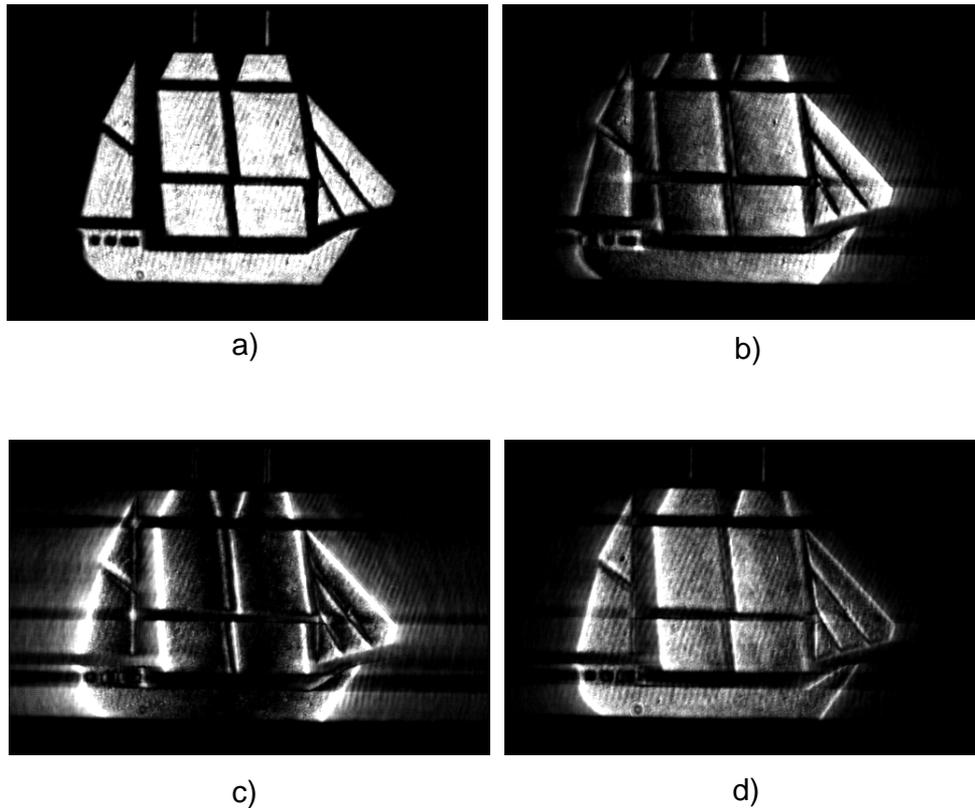


Figura 2.14: Transformada fraccional de Hilbert realizada con un filtro de fase dinámica codificado en la LCD Kopin 640: (a) Imagen del objeto ($P = 0$), (b) $P = 0.5$, (c) $P = 1$, y (d) $P = 1.5$

2.6 Conclusiones

Las LCDs tipo TN son originalmente diseñadas para operar en el modo de modulación en amplitud. Aunque este tipo de dispositivos presentan una

modulación conjunta entre amplitud y fase, se les puede configurar para operar en el modo de modulación mayormente en fase. Tal configuración fué establecida para las LCDs Kopin 640 y Kopin 320. El procedimiento general de caracterización que se siguió en este capítulo se resume de la siguiente manera:

1. Orientación del director molecular. El modo de modulación mayormente en fase en una LCD tipo TN se obtiene al hacer incidir luz linealmente polarizada paralela al director molecular. De aquí la importancia en la determinación de este parámetro. Empleando el método de Kirsch en conjunto con el método de Zhang, se encontró que la orientación del director molecular en la parte frontal para la LCD Kopin 640 y Kopin 320 está a 69 y 41 grados, respectivamente.

2. Configuración polarizador/analizador. Particularmente, esta configuración fué establecida con un polarizador que orienta la luz de entrada con una polarización paralela al director molecular y un analizador, que fué orientado a manera de minimizar la variación de la modulación en amplitud en cada LCD. Las configuraciones polarizador/analizador obtenidas, para el caso en que incide luz linealmente polarizada paralela a eje director, fueron $69^\circ/21^\circ$ y $41^\circ/266^\circ$ para la Kopin 640 y Kopin 320, respectivamente.

3. Medición de la modulación en fase. La máxima modulación en fase soportable por cada LCD fué estimada indirectamente empleando el método de caracterización de Zhang et al considerando $\lambda = 632.8 \text{ nm}$. Para las LCD Kopin 640 y Kopin 320 se obtuvo una máxima modulación de 1.865π y 1.7485π , respectivamente.

La codificación de EDOs de fase en una LCD requiere del conocimiento previo de los valores de fase a los cuales el diseño debe restringirse. Para determinar tales valores, empleamos un método novedoso no interferométrico para la caracterización de valores de fase igualmente espaciados en cada LCD. Este método está basado en la optimización electro-óptica de rejillas tipo Blaze. Además de ser un método automatizado y de fácil implementación, no presenta ambigüedad en la determinación de fases complementarias entre ϕ y $2\pi - \phi$.

La codificación de una rejilla tipo Blaze y un filtro de fase para realizar la transformada fraccional de Hilbert fueron presentados como ejemplos ilustrativos experimentales para comprobar el resultado del proceso de caracterización en cada LCD.

La caracterización de una LCD nos ayuda a entender bajo que parámetros puede emplearse tal dispositivo como SLM. Con el conocimiento previo de los parámetros que caracterizan a las LCDs antes presentadas, en los capítulos subsecuentes se presenta la implementación de EDPs reconfigurables con LCDs.

Capítulo 3

Lentes pixelizadas reconfigurables.

Un breve análisis de las propiedades de las LPs y de su distribución de campo focal es presentado en este capítulo. Además, se propone la implementación de LPs reconfigurables empleando LCDs para la creación de dos dispositivos: El primero de ellos es un focalizador bidimensional direccionable, que tiene la capacidad de ajustar, no solamente su longitud focal, sino también la posición de su foco en un plano. El segundo dispositivo es un generador reconfigurable de arreglos de focos, el cual, se compone de un arreglo de LPs capaces de direccionar su foco de manera independiente. Resultados experimentales son presentados confirmando la realización de estos dispositivos.

3.1 Introducción

Los EDOs pueden ser diseñados para operar en el régimen de Fresnel como dispositivos focalizadores. A este tipo de elementos comúnmente se les conoce como “*lentes difractivas*” (LDs). Usualmente, el diseño de EDOs debe ser sometido a ciertas restricciones impuestas por el proceso de fabricación a emplearse. Si una LD va ser fabricada con técnicas de litografía de baja resolución o codificada en un SLM, su diseño es generalmente restringido por una estructura pixelizada (p. Ej. La estructura pixelizada de una LCD). Este tipo de LDs es conocida en la literatura como “*lentes de Fresnel de baja resolución*” [12, 13]. En este Capítulo nos referiremos a este tipo de lentes como “*lentes pixelizadas*” (LPs) [21, 22]. Las LPs han sido propuestas en aplicaciones tales como formación de imágenes múltiples [19], diferenciación de imágenes [16] y análisis de fase de haces difractados [17].

El propósito de este Capítulo es mostrar la versatilidad que representa el empleo de una LCD para la codificación en tiempo real de LPs. En este contexto se presenta la implementación de dos dispositivos reconfigurables. Uno de ellos es un dispositivo focalizador direccionable que tiene la capacidad de modificar la posición de su foco en el espacio. Adicionalmente, se presenta la realización de un dispositivo generador de arreglos de focos direccionables, basado en la codificación dinámica de un arreglo de LPs.

El desarrollo de este capítulo contempla primeramente un breve análisis teórico de las LPs y sus propiedades. En la sección 3.2 se describe una formulación para el campo de Fresnel de los EDPs. A partir de esta formulación, en la sección 3.3 se analiza teóricamente la distribución del campo focal de una LP y sus propiedades. En la sección 3.4 se presenta el diseño e implementación

experimental de LPs codificables en una LCD. Una descripción teórica de la forma en la que la posición del foco de una LP puede ser modificada se muestra en la sección 3.5. En base a esta descripción se emplea la reconfigurabilidad de una LCD para la realización de los dispositivos focalizadores antes mencionados. Por último, en la sección 3.6 se presentan las conclusiones.

3.2 Campo de Fresnel de un EDP

Para describir el campo de Fresnel de un EDP, consideremos una estructura pixelizada como la que se presenta en la Fig. 3.1, donde los pixeles del elemento son rectangulares y tienen un retardo de fase ϕ_{nm} . Aunque la estructura de este elemento es bidimensional, por simplicidad y dada la naturaleza separable de los EDPs que serán descritos consideraremos una formulación unidimensional.

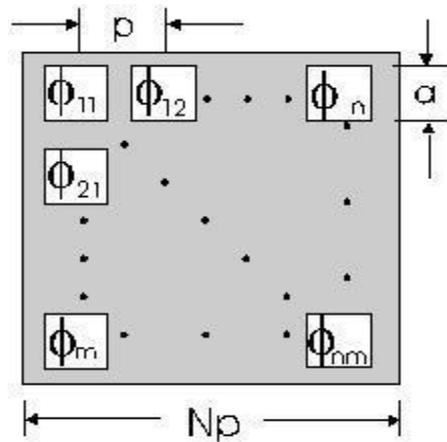


Figura 3.1: Estructura de un EDP.

La representación matemática de la pupila de un pixel en un EDP se expresa mediante la función rectangular

$$w(x) = \text{rect}(x/a), \quad (3.1)$$

donde a corresponde al tamaño lateral de los pixeles (centrados en las posiciones $x_n = np$, considerando a p como la distancia entre pixeles. La transmitancia de fase asignada al n -ésimo pixel es representada por la función $\exp[i\phi_n]$.

A modo de simplificar nuestra formulación asumiremos un número impar de pixeles $N = 2Q + 1$ (La expresin generalizada para la transmitancia de un EDP se describe en el Apéndice C). Consecuentemente, la transmitancia del EDP se expresa entonces de la forma:

$$t(x) = \sum_{n=-Q}^Q \exp[i\phi_n]w(x - np). \quad (3.2)$$

Asumiendo que una onda plana unitaria (de longitud de onda λ) ilumina al EDP, el cálculo en la distribución de campo $U(x)$ a una distancia z se obtiene empleando la integral unidimensional de la difracción de Fresnel [1] como,

$$U(x, z) = \frac{1}{\sqrt{\lambda z}} \exp \left[\frac{i\pi x^2}{\lambda z} \right] \int_{-\infty}^{\infty} t(x_0) \exp \left[\frac{i\pi x_0^2}{\lambda z} \right] \exp \left[\frac{-i2\pi x_0 x}{\lambda z} \right] dx_0. \quad (3.3)$$

Sustituyendo la Ec.(3.2) en la Ec. (3.3) obtenemos

$$U(x, z) = \frac{1}{\sqrt{\lambda z}} \exp \left[\frac{i\pi x^2}{\lambda z} \right] \sum_{n=-Q}^Q \exp[i\phi_n] \int_{-\infty}^{\infty} w(x_0 - np) \exp \left[\frac{i\pi x_0^2}{\lambda z} \right] \times \exp \left[\frac{-i2\pi x_0 x}{\lambda z} \right] dx_0. \quad (3.4)$$

Haciendo el cambio de variable $x'_0 = x_0 - np$ en la Ec.(3.4), tenemos que

$$U(x, z) = \frac{1}{\sqrt{\lambda z}} \exp\left[\frac{i\pi x^2}{\lambda z}\right] \sum_{n=-Q}^Q \exp[i\phi_n] \exp\left[\frac{i\pi n^2 p^2}{\lambda z}\right] \exp\left[\frac{-i2\pi x np}{\lambda z}\right] \times \int_{-\infty}^{\infty} w(x'_0) \exp\left[\frac{i\pi x'^2_0}{\lambda z}\right] \exp\left[\frac{-i2\pi x'_0(x - np)}{\lambda z}\right] dx'_0, \quad (3.5)$$

si además, consideramos que el ancho a del pixel es mucho más pequeño que la distancia de observación z , la Ec (3.5) puede reducirse a la siguiente expresión:

$$U(x, z) = \frac{a}{\sqrt{\lambda z}} \exp\left[\frac{i\pi x^2}{\lambda z}\right] \sum_{n=-Q}^Q \exp[i\phi_n] \exp\left[\frac{i\pi n^2 p^2}{\lambda z}\right] \exp\left[\frac{-i2\pi x np}{\lambda z}\right] \times \text{sinc}\left[\frac{a}{\lambda z}(x - np)\right]. \quad (3.6)$$

La Ec.(3.6) es una representación adecuada del campo de difracción de Fresnel de un EDP, que puede ser empleada para el diseño de elementos tales como focalizadores y arreglos de iluminación tipo Fresnel [21].

3.3 Descripción del campo focal de una LP

La función de fase de una LP puede obtenerse especificando un EDP cuya operación sea la de un dispositivo focalizador. En tal caso se requiere que la intensidad axial del EDP $|U(x = 0)|^2$, a una distancia z , tenga un valor máximo. Es interesante notar, a partir de la Ec.(3.6), que este máximo puede lograrse cuando la distribución de fase del EDP es

$$\exp[i\phi_n] = \exp\left[\frac{-i\pi n^2 p^2}{\lambda z}\right]. \quad (3.7)$$

La única condición necesaria para obtener una intensidad máxima axial con la distribución de fase descrita en la Ec.(3.7) es que el factor $\text{sinc}[anp/\lambda z]$, para $U(x = 0)$, tenga valores positivos para todos los pixeles. Este requerimiento se satisface cuando se cumple la siguiente relación

$$\frac{a}{\lambda z} Qp < 1. \quad (3.8)$$

La distribución de fase representada por la Ec.(3.7) transforma al EDP en un elemento focalizador pixelizado; es decir, en una LP. Sustituyendo la Ec.(3.7) en la Ec.(3.6) se obtiene la expresión del campo de Fresnel de la LP, de la forma

$$U(x, z) = \frac{a}{\sqrt{\lambda z}} \exp \left[\frac{i\pi x^2}{\lambda z} \right] \sum_{n=-Q}^Q \exp \left[\frac{-i2\pi xnp}{\lambda z} \right] \text{sinc} \left[\frac{a}{\lambda z} (x - np) \right]. \quad (3.9)$$

En el argumento de la función “sinc” expresada en la Ec.(3.9) podemos notar que la distribución de campo $U(x)$ muestra un arreglo de focos desplazados lateralmente. La periodicidad de este arreglo de focos es $\lambda z/p$. Esta formulación tiene la ventaja de proveer una forma simple para calcular la distribución de campo de una LP a partir de la estructura de un EDP.

Para calcular el valor pico de intensidad en el foco principal de una LP empleamos la Ec.(3.9). De este modo la intensidad axial en el plano focal de una LP es dada por

$$I(0) = \frac{a^2}{\lambda z} \left[\sum_{n=-Q}^Q \text{sinc} \left(\frac{anp}{\lambda z} \right) \right]^2. \quad (3.10)$$

La Fig. 3.2 muestra el comportamiento de la intensidad axial del foco principal de una LP con la distancia z . Obsérvese que un máximo de $I(0)$ ocurre para un valor de z llamada “ z óptima”, es decir, una cantidad de energía máxima se concentra en el foco principal para una LP diseñada a esta distancia de focalización. Del cálculo numérico que provee la Fig. 3.2, podemos determinar que la distancia focal óptima es

$$z = z_{optima} = 0.73 \frac{apN}{\lambda}. \quad (3.11)$$

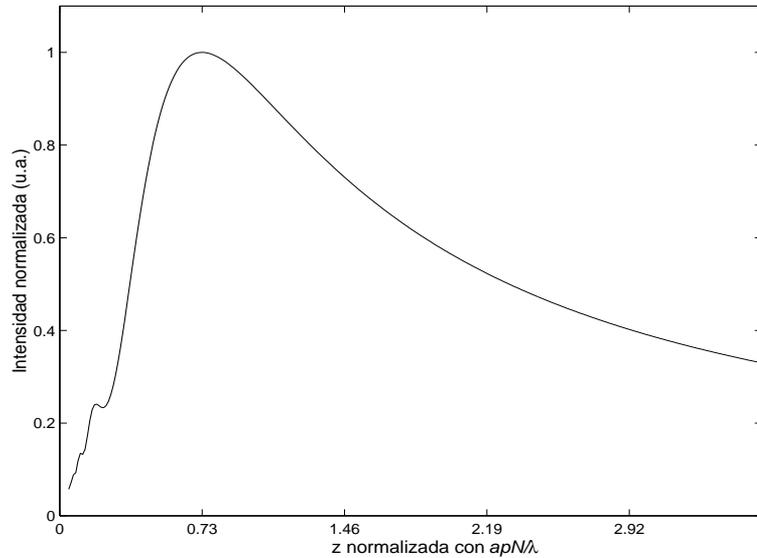


Figura 3.2: Intensidad axial en el foco principal de una LP.

La Fig.3.3 ilustra de manera gráfica la intensidad del foco principal de una LP 1-D con 501 pixeles y un número-f ($f_N \equiv f/Np$), $f_N \approx 20.7$, comparada con la intensidad del foco de una lente continua con f_N equivalente.

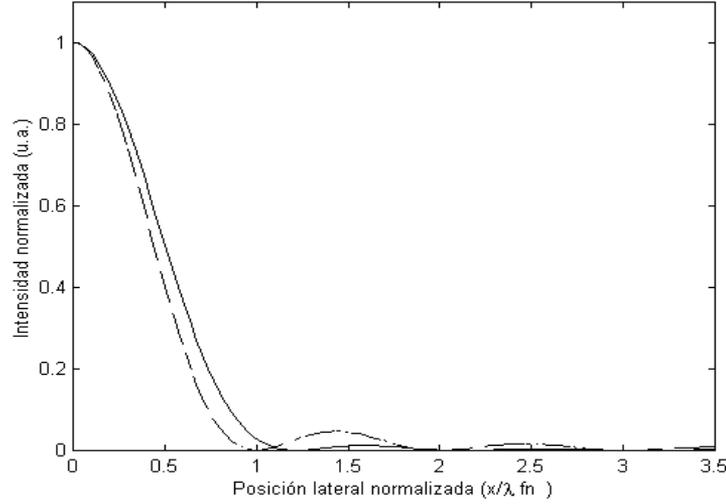


Figura 3.3: Intensidad del foco principal de una LP (curva continua) y la del foco de una lente continua (curva segmentada).

Nótese que en este ejemplo el foco principal de la LP presenta lóbulos secundarios atenuados. A este efecto, que se origina en el tamaño finito del pixel, lo hemos llamado efecto de autoapodizado de una LP. Para comprender este efecto, en [22] se emplea una expresión alterna para el cálculo el campo focal de de una LP, dada como

$$U(x, z) = \frac{N}{\sqrt{\lambda z}} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left\{ \exp \left[\frac{i\pi x^2}{\lambda z} \right] \text{sinc} \left[\frac{Np}{\lambda z} \left(x - \frac{n\lambda z}{p} \right) \right] \right\} \otimes \text{rect} \left[\frac{x}{a} \right]. \quad (3.12)$$

De la Ec.(3.12) podemos notar que el campo $U(x)$ presenta una colección de focos lateralmente desplazados. La periodicidad de este arreglo de focos es $\lambda z/p$. Si consideramos un número grande de pixeles N , los focos adyacentes aparecen aislados, en el plano focal, con una pequeña interferencia mutua. Bajo

esta condición, el campo focal de la LP alrededor de la posición focal $x = 0$ es dado por

$$\psi_0(x) \simeq \frac{N}{\sqrt{\lambda z}} \left[\exp\left(\frac{i\pi x^2}{\lambda z}\right) \text{sinc}\left(\frac{Npx}{\lambda z}\right) \right] \otimes \text{rect}\left(\frac{x}{a}\right). \quad (3.13)$$

donde \otimes expresa la operación de convolución. Mediante cálculos numéricos de la expresión (3.13), bajo ciertas condiciones, se demuestra que es posible apodizar el perfil de la función “sinc” por la convolución con la función “rect” [22]. Un resultado importante encontrado a partir de este análisis numérico fué que el grado de apodización es dependiente principalmente de la razón

$$r = a/\lambda f_N. \quad (3.14)$$

Una medición del grado de apodización que presenta el foco principal de una LP dada puede ser obtenida de la razón de intensidades $I_{10} = I_1/I_0$ (donde I_0 e I_1 corresponden a las intensidades pico del lóbulo principal y secundario, respectivamente). Para el foco de una lente continua esta razón esta dada como $I_{10} \simeq 0.0472$. Por lo tanto, el grado de apodización normalizado para una LP puede definirse como

$$A = I_{10}/0.0472. \quad (3.15)$$

La dependencia de la apodización A contra r , calculada mediante la expresión (3.13), se muestra en la Fig. 3.4 (curva inferior). Un efecto inherente a la apodización es el ensanchamiento En del lóbulo principal del foco principal. Tal ensanchamiento es evaluado por la razón $En = \Delta_p/\Delta_c$, donde Δ_p denota el tamaño del lóbulo principal del foco para la LP y Δ_c es la longitud

correspondiente al lóbulo principal del foco de la lente continua. El grado de ensanchamiento En contra r también es presentado en la Fig. 3.4 (curva superior). Las gráficas en la Fig. 3.4 corresponden a diferentes combinaciones de los parámetros de la LP con la única restricción de que $z \gg a$. De la Fig. 3.4 podemos apreciar que el máximo apodizado ($A \approx 0.05$) ocurre para cuando $r \approx 2.0$. Por otro lado, obsérvese que A tiende a la unidad cuando r tiende a cero. Tal condición ocurre incrementando f_N ó reduciendo el tamaño a del pixel. De tal manera que el foco principal será similar al de una lente continua no solamente para una lente muestreada (con $a \rightarrow 0$) sino también para una LP (con a finita) si la longitud focal es suficientemente grande.

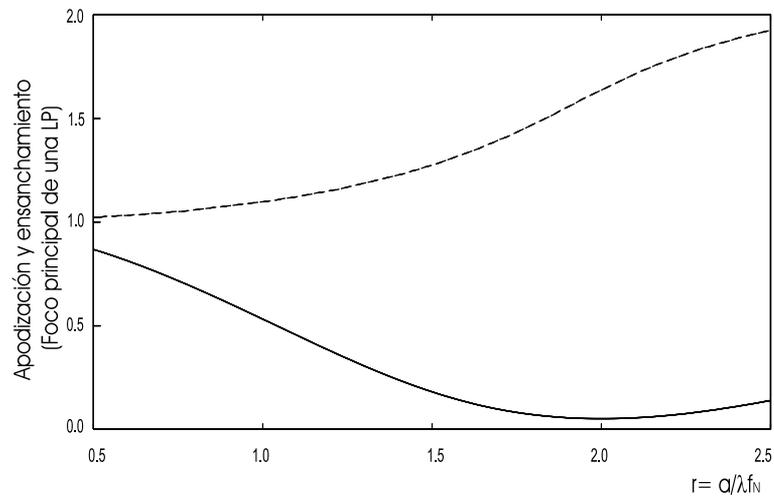


Figura 3.4: Grado de apodización de una LP como función de la razón $r = a / \lambda f_N$ (curva continua) y el correspondiente ensanchamiento En de su foco principal (curva segmentada.)

3.4 Diseño de LPs codificables en una LCD

El relieve de fase parabólico obtenido en la Ec.(3.7) representa una solución práctica para el diseño de una LP. Sin embargo, cuando se requiere que una LP sea codificada en una LCD, la solución ó diseño final debe estar sometida a ciertas restricciones de fase.

El procedimiento de diseño que aquí empleamos parte de la solución sin restricciones de fase, que ofrece la Ec.(3.7), para después someterla a las restricciones de fase requeridas para su codificación en una LCD. Los pasos a seguir en este procedimiento se enumeran a continuación.

1. Se calcula la distribución de fase inicial ϕ_n (con $n = -Q : Q$) sin restricciones apartir de la formulación expresada en la Ec.(3.7).
2. La distribución de fase ϕ_n es confinada al módulo 2π .
3. Se aplican las restricciones de fase a ϕ_n de acuerdo al siguiente criterio de cuantización de fase:

Los escalones de cuantización de fase se definen como $\hat{\phi}_q = -i2\pi q/M$, donde, $q = 0, 1, 2, \dots, M - 1$ y M es el número de niveles de cuantización de fase. Cuando el valor de ϕ_n se encuentra entre dos de estos escalones de fase cuantizada, entonces el valor de fase de ϕ_n es cambiado por el del escalón de fase cuantizada inferior.

Un ejemplo ilustrativo del diseño de una LP unidimensional para su codificación en la LCD Kopin 640 se presenta en la Fig. 3.5. Esta LP consta de 639 pixeles y fué diseñada con una razón $r = 1.37$ (que corresponde a la intensidad axial máxima en el foco principal). Para simplificar la codificación de

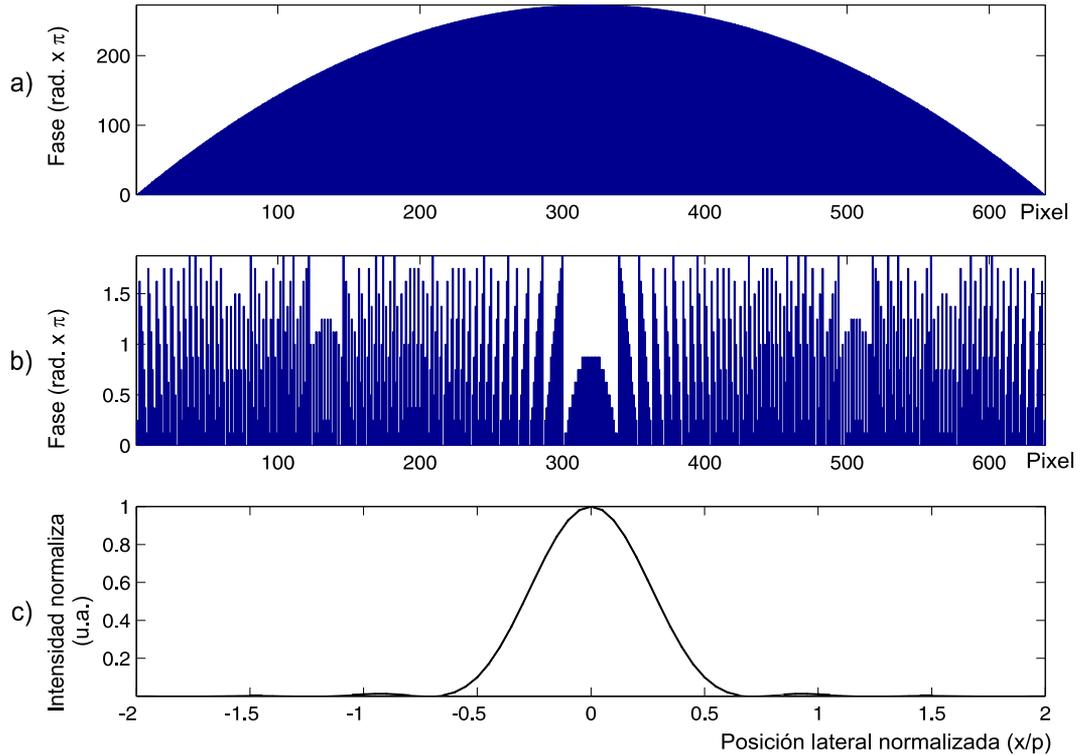


Figura 3.5: Lente pixelizada: a) sin restricciones de fase, b) cuantizada a 16 niveles de fase y c) su foco principal calculado numéricamente.

esta lente en la LCD, la distribución de fase de la LP fué cuantizada a 16 valores de fase (ver Fig. 3.5 (b)). En la Fig. 3.5 (c) se muestra un cálculo numérico de su foco principal (empleando una $\lambda = 632.8 \text{ nm}$) correspondiente a esta LP, con un grado de apodizado $A \approx 0.26$ y un ancho del lóbulo principal $\Delta_x \approx 22 \mu\text{m}$.

3.4.1 Implementación experimental.

El diseño realizado en la sección anterior fué implementado experimentalmente empleando un sistema electro-óptico como el que se ilustra en la Fig. 3.6.

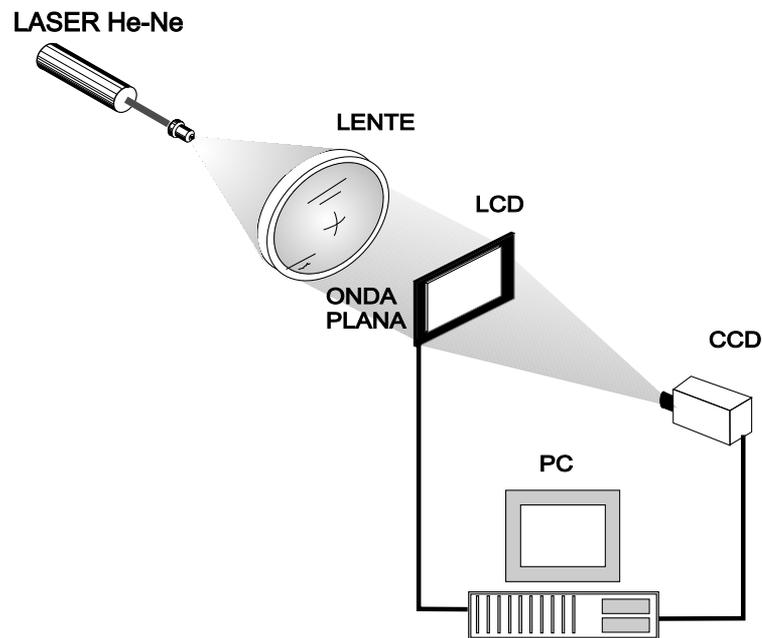


Figura 3.6: Sistema electro-óptico para la implementación experimental de LPs.

La fig. 3.7 muestra un perfil transversal del foco principal resultante detectado con una cámara CCD colocada en el plano de focalización.

El ancho experimental del lóbulo principal es $\Delta_x \approx 32 \mu m$. Lo que representa alrededor de 38% más grande que el ancho del foco de una lente continua correspondiente. El grado de apodizado mostrado por el foco principal de la LP experimental es $A \approx 0.29$, el cual es una buena aproximación al cálculo realizado numéricamente ($A \approx 0.26$).

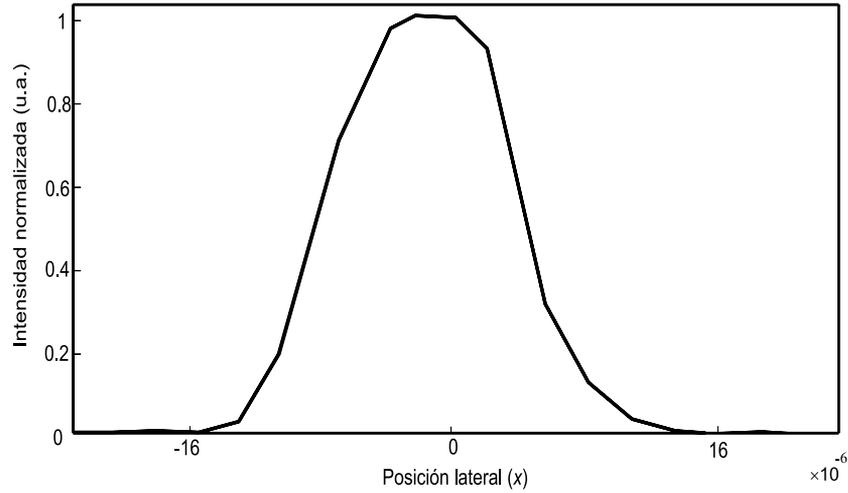


Figura 3.7: Foco experimental de la LP implementada con la LCD Kopin 640.

3.5 LPs con foco direccionable.

El foco de una LP puede ser desplazado lateralmente cuando se emplea una modificación a su función de fase como:

$$\exp[i\phi_n] = \exp\left[\frac{-i\pi(np - x_d)^2}{\lambda z}\right]. \quad (3.16)$$

donde x_d es un desplazamiento lateral arbitrario en el vértice de la LP. De manera que, al modificar z y x_d podemos no solamente ajustar la longitud focal de la LP, sino también la posición de su foco en un plano.

Para comprobar esto consideremos los parámetros de la LCD Kopin 320 ($a = 12\mu m$ y $p = 15\mu m$) empleados en la Ec.(3.16) para el diseño de una LP unidimensional con 319 píxeles, con $z = 40\text{ cms}$ y $x_d = 50p = 0.075\text{ cms}$. En la Fig. 3.8(a) se muestra el diseño de la LP sin restricciones de fase. Empleando

la distribución de fase de la LP cuantizada a 8 niveles (ver Fig. 3.8(b)) en la Ec.(3.6) se calculó numéricamente la distribución de campo en el plano focal, el cual se presenta en intensidad en la Fig. 3.8(c). Como puede apreciarse el foco principal ha sido desplazado lateralmente sobre la derecha en 0.075 cms ($50p$).

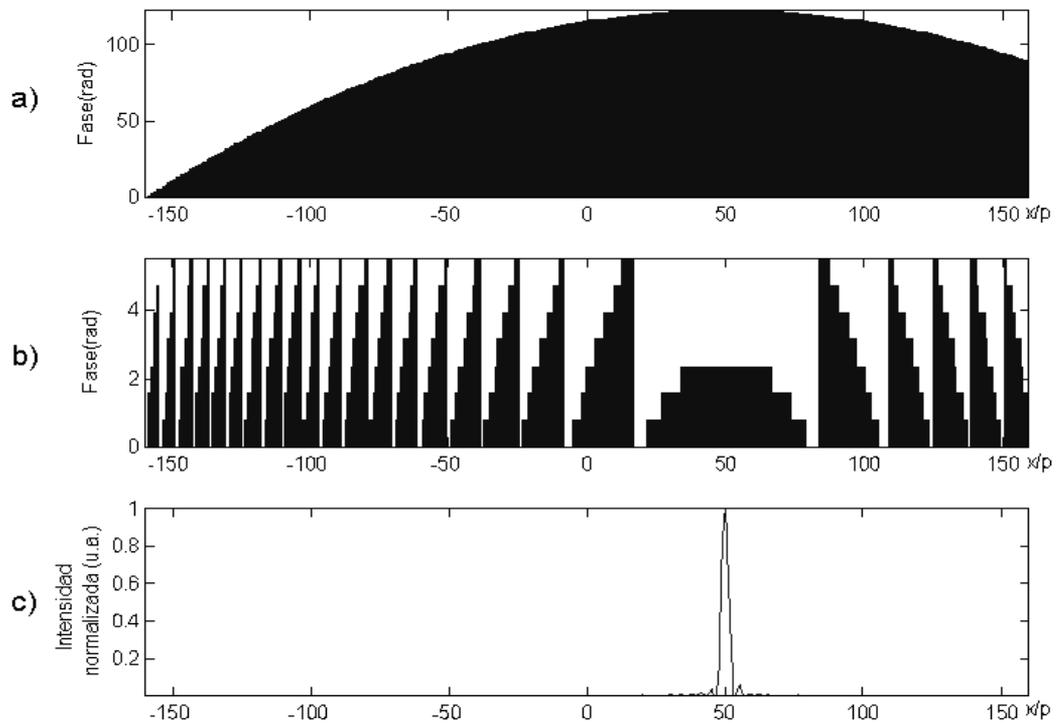


Figura 3.8: Lente pixelizada con foco desplazado lateralmente: a) sin restricciones de fase, b) cuantizada a 8 niveles de fase y c) su foco principal calculado numéricamente.

3.5.1 Aplicaciones e implementación experimental.

Primeramente, se llevo a cabo la implementación de un focalizador o LP bidimensional con foco direccionable. Este dispositivo dinámico tiene la función de realizar un barrido o desplazamiento de su foco sobre un plano. Un programa

que interpreta la computadora fué diseñado para direccionar y reconfigurar la distribución de fase en la LCD Kopin 320.

Una secuencia en la reconfiguración de fase de la LP se muestra en imágenes a escala de gris sobre el lado izquierdo de la Fig. 3.9. El desplazamiento del foco principal fué detectado en intensidad por medio de la CCD (véase secuencia en las imágenes sobre la derecha de la Fig. 3.9). La LP consta de 320×240 pixeles, está cuantizada a 8 niveles de fase y su plano focal se encuentra en $z = 40 \text{ cms.}$

Un dispositivo adicional que se presenta en este contexto es la codificación de arreglos de LPs. Al igual que en la aplicación anterior se diseñó un programa para la codificación de arreglos de LPs en una LCD, en este caso, los focos de cada lente pueden ser direccionados de forma independiente.

Las Fig. 3.10 (a) presentan la distribución de fase y la distribución en intensidad del campo focal experimental de un arreglo de 5×5 LPs (de 47×47 pixeles y cuantizadas a 8 niveles de fase) con focos centrados en eje. Por otro lado, en una etapa subsecuente vemos el arreglo de lentes, en la Fig. 3.10(b), que genera un arreglo de 25 focos con posiciones desplazadas.

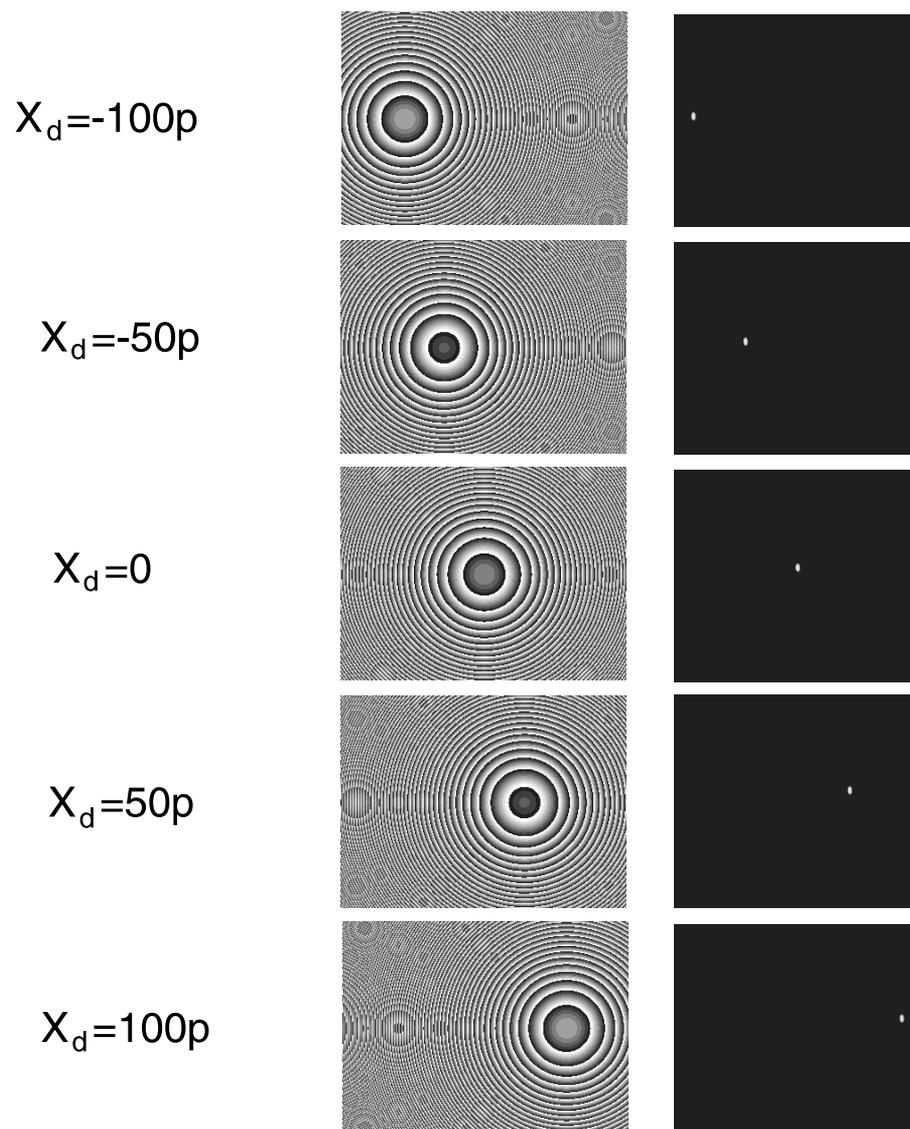


Figura 3.9: Lente con foco direccionable empleando una LCD: (izquierda) imagen en escala de grises que representa la distribución de fase, (derecha) Campo focal resultante.

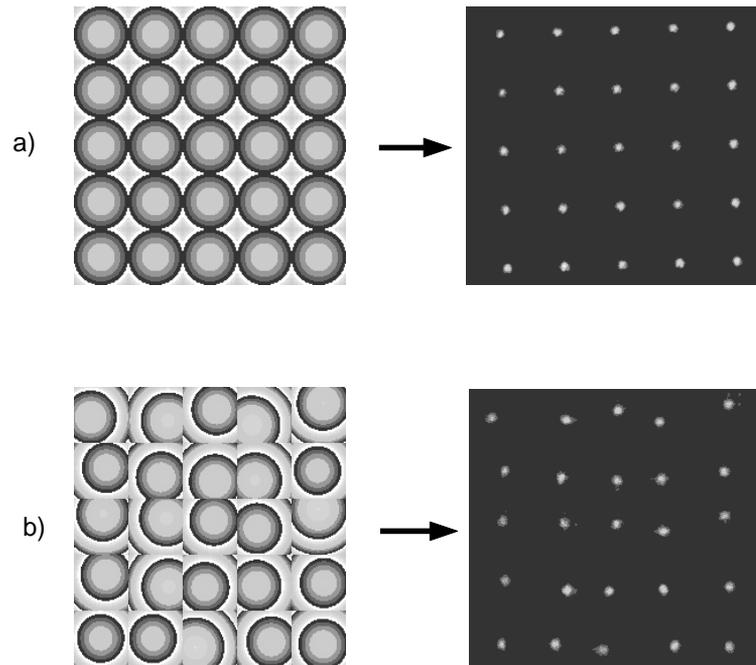


Figura 3.10: Arreglo de 5×5 LPs codificada en una LCD: a) distribución de fase cuantizada a 8 niveles con focos igualmente espaciados b) distribución de fase cuantizada a 8 niveles con focos en posiciones arbitrarias.

3.6 Conclusiones.

Un análisis teórico de la LPs y la distribución de su campo focal fué presentado. El foco principal de una LP presenta un grado de atenuación en sus lóbulos secundarios al cual hemos llamado “efecto de autoapodizado. Este peculiar efecto se origina en el tamaño finito del pixel de la LP. El grado de apodizado en una LP depende principalmente de la razón $r = a/\lambda f_N$.

Las LCDs, además de poseer una estructura espacial semejante a la de

un EDP, presentan restricciones de fase. Si se desea codificar una LP en una LCD, el diseño terminal debe considerar tales restricciones. En este capítulo hemos presentado el diseño de LPs codificables en una LCD. Basado en este procedimiento, la implementación y evaluación experimental de una LP en una LCD fué llevada a cabo.

Considerando la capacidad de reconfigurabilidad de una LCD, se propuso la realización de un dispositivo focalizador, cuyo foco puede ser ajustado en tiempo real. La operación de este dispositivo fué verificado experimentalmente. Otra aplicación en este contexto fué la implementación experimental de arreglos de lentes reconfigurables, mediante el uso de una LCD, cuyos focos pueden ser direccionables de forma independiente.

De las aplicaciones antes mencionados podemos apreciar un posible panorama de nuevas tareas por explorar. Una de ellas es el uso de LPs reconfigurables en tareas de “*barrido*” y la otra en la realización de interconexiones ópticas reconfigurables.

Capítulo 4

Diseño de elementos difractivos pixelizados tipo Fourier

El algoritmo “templado simulado” (del inglés “simulated annealing”) es empleado para la optimización de EDPs tipo Fourier. También se presenta la optimización de EDPs cuya modulación de fase es restringida por una simetría similar a la del patrón de difracción deseado. Haciendo uso de algunos ejemplos, mostramos como los elementos optimizados bajo esta restricción, muestran un mejor desempeño en comparación con los optimizados convencionalmente, para los cuales la función de fase es modificada de forma totalmente aleatoria. Adicionalmente, los EDPs restringidos por una simetría espacial son optimizados con un esfuerzo computacional relativamente menor.

4.1 Introducción

Los EDOs tipo Fourier han venido a ser una poderosa herramienta para la conversión de una señal de luz incidente en un patrón de difracción deseado. Este tipo de elementos han sido empleados en aplicaciones tales como interconexión óptica [52], adición de haces coherentes [53] y formación de imágenes múltiples [54]. Con la introducción de las técnicas de fabricación de baja resolución y de los moduladores espaciales de luz, los EDPs han surgido como una alternativa más para la fabricación de EDOs. El diseño de este tipo de EDOs es sometido a restricciones del tipo espacial (en este caso una estructura pixelizada) y de fase. Los métodos de optimización, tales como “templado simulado” (que denotamos SA por sus siglas en inglés de “*Simulated Annealing*”) [8] y algoritmos genéticos [10], pueden realizar el diseño de EDPs de manera apropiada.

El propósito de este Capítulo es analizar y diseñar EDPs tipo Fourier empleando el algoritmo SA. Particularmente, demostramos que el diseño directo [11] de EDPs tipo Fourier totalmente cuantizados puede llevarse a cabo con ventajas (con respecto al diseño convencional) si los elementos son restringidos a una simetría similar a la del patrón de difracción deseado [55, 56]. Los diseños resultantes, considerando esta restricción en el algoritmo SA, presentan una mejor reconstrucción de la señal deseada comparada con la obtenida de los EDPs diseñados con el algoritmo SA convencional. También se demuestra que los diseños restringidos por simetría son optimizados con un menor esfuerzo computacional.

El algoritmo SA puede ser empleado para el diseño de EDOs tipo Fourier con diferentes propósitos. Sin embargo, por brevedad nos limitaremos al caso de generadores de arreglos de iluminación tipo Fourier. En la sección 2 presentamos

una breve revisión teórica de estos elementos. La sección 3 describe el algoritmo SA y la modificación que le hemos hecho para imponer restricciones de simetría a nuestros diseños. Mediante algunos ejemplos, en la sección 4, se ilustran las ventajas que esta modificación ofrece con respecto a los diseños obtenidos con el algoritmo convencional. Por último, en la sección 5 se presentan las conclusiones de este capítulo.

4.2 Arreglos de iluminación tipo Fourier espacialmente cuantizados.

Consideremos un EDP con una estructura periódica como la que se muestra en la Fig. 4.1. La celda básica de este EDP esta formada por un arreglo de $M \times M$ pixeles cuadrados, donde, ϕ_{nm} representa el retardo de fase correspondiente al pixel (n, m) con lado a . El período d que corresponde a la extensión lateral de la celda básica se asume como $d = 1$, y por lo tanto la distancia entre pixeles es $a = 1/M$. La estructura completa del EDP se forma por $L \times L$ réplicas de la celda básica.

Para representar la transmitancia del EDP emplearemos las siguientes funciones:

$$e(x, y) = \text{rect}(x/a)\text{rect}(y/a), \quad (4.1)$$

que representa la función de pupila del pixel y

$$s(x, y) = \text{rect}(x/L)\text{rect}(y/L), \quad (4.2)$$

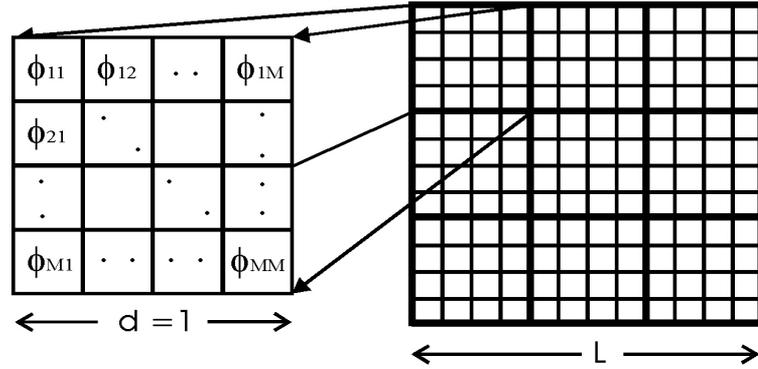


Figura 4.1: Estructura de un EDP periódico de fase, cuya celda básica se forma de $M \times M$ píxeles.

que representa a la función de abertura del elemento completo.

La transmitancia en amplitud del EDP puede ser entonces expresada como

$$t(x, y) = [c(x, y) \otimes \text{comb}(x, y)]s(x, y), \quad (4.3)$$

donde $c(x, y)$ es la transmitancia de la celda básica, dada por

$$c(x, y) = e(x, y) \otimes \sum_{n,m=1}^M \exp(i\phi_{nm})\delta(x - na)\delta(y - ma). \quad (4.4)$$

Iluminando con un campo luminoso unitario y considerando el teorema de la convolución en la teoría de Fourier, el campo de difracción del EDP se expresa como

$$T(u, v) = \sum_{q,l=-\infty}^{\infty} E(q, l)W(q, l)S(u - q, v - l), \quad (4.5)$$

donde, (q, l) representa a los índices de cada orden de difracción,

$$E(q, l) = \text{sinc}(q/M)\text{sinc}(l/M), \quad (4.6)$$

$$W(q, l) = \frac{1}{M^2} \sum_{n,m=1}^M \exp(i\phi_{nm}) \exp \left[-i2\pi \left(\frac{qn + lm}{M} \right) \right], \quad (4.7)$$

y

$$S(u, v) = L^2 \text{sinc}(Lu)\text{sinc}(Lv). \quad (4.8)$$

El campo de difracción, representado por la Ec.(4.5), esta formado por réplicas lateralmente desplazadas de la función de respuesta $S(u, v)$ de la abertura del EDP. Cada réplica viene a ser modulada por el factor $E(q, l)W(q, l)$. $E(q, l)$ es una envolvente “sinc” relativamente extensa en el espacio, cuyos ceros se localizan en

$$u = \alpha M \text{ y } v = \beta M, \quad (4.9)$$

siendo α, β números enteros diferentes de cero. Finalmente, la función de peso $W(q, l)$, que corresponde a la transformada de Fourier discreta de la matriz de retardo de fase $\exp(i\phi_{nm})$, es periódica con periodicidad M en ambas coordenadas. De aquí que, $W(q, l)$ es enteramente determinada por la definición de su celda básica, en el conjunto de órdenes de difracción:

$$\Omega_W = \{(q, l) \mid q, l : -M/2 + 1, \dots, M/2\}. \quad (4.10)$$

En la definición de la celda básica, Ω_W , se asume que M es un número par.

Los EDOs tipo Fourier son usualmente diseñados para proveer un patrón de difracción deseado dentro de una ventana finita del plano de Fraunhofer. El procedimiento de optimización, que empleamos como método de diseño, está destinado a maximizar la eficiencia de difracción y la uniformidad en la intensidad de los órdenes de difracción en una ventana Ω_S , la cual viene a ser subconjunto de Ω_W .

La eficiencia de difracción en el orden (q, l) en este tipo de elementos está dada por:

$$\eta_{ql} = E^2(q, l) |W(q, l)|^2. \quad (4.11)$$

Para especificar al EDO ideal es conveniente definir un conjunto de eficiencias locales de referencia ϵ_{ql} , proporcionales a las intensidades deseadas en los órdenes de difracción $(q, l) \in \Omega_S$, que satisfacen la condición [18]:

$$\sum_{q, l \in \Omega_S} \epsilon_{ql} = 1. \quad (4.12)$$

Asociado al patrón de difracción deseado definimos una función de peso de referencia o ideal, $W_I(q, l)$, tal que satisfaga las siguientes propiedades:

$$W_I(q, l) = 0, \text{ si } (q, l) \in \{\Omega_W \setminus \Omega_S\}, \quad (4.13)$$

$$E^2(q, l) |W_I(q, l)|^2 = \epsilon_{ql}, \text{ si } (q, l) \in \Omega_S. \quad (4.14)$$

En la Ec.(4.13), $\{\Omega_W \setminus \Omega_S\}$, representa al conjunto de órdenes de difracción que pertenecen a Ω_W pero no a Ω_S . El término del lado izquierdo de la Ec.(4.14) corresponde a la eficiencia local asociada al valor de la función de peso ideal para el orden de difracción (q, l) . Esta definición de la función de peso ideal es empleada en el algoritmo de optimización que se describe y discute a continuación.

4.3 Algoritmo de optimización

El método que empleamos para el diseño de EDPs se basa en el algoritmo SA. El algoritmo SA precisa de la definición de una función de costo C para medir la desviación entre el campo de reconstrucción del diseño real y el del diseño deseado. La función de costo asociada a nuestro procedimiento de optimización está dada por [57]:

$$C = \sum_{(q,l) \in \Omega_W} \left| |W_I|^2 - \gamma |W|^2 \right|^2, \quad (4.15)$$

donde, W_I es la función de peso del EDO ideal, W es la función de peso del elemento real, y γ es un factor de escala dado por:

$$\gamma = \frac{\sum_{\Omega_W} |W_I|^2}{\sum_{\Omega_W} |W|^2}. \quad (4.16)$$

El objetivo de este procedimiento de optimización es minimizar la función de costo C . El proceso de diseño comienza con la generación de una distribución de fase (cuantizada) aleatoria del EDO, la cual llamaremos distribución de fase inicial. En una iteración típica del algoritmo SA un pixel de la celda básica se selecciona de forma aleatoria, y su modulación de fase se cambia por un

valor nuevo cuantizado. La función de costo para esta nueva configuración es evaluada. Si la nueva función de costo decrece, el valor de fase modificado es aceptado de forma automática. De otro modo, la aceptación depende de la distribución de probabilidad $P(\Delta C) = \exp(-\Delta C/T)$, donde ΔC es la variación de la función de costo y T es un parámetro ficticio de temperatura (parámetro que es adoptado del proceso de enfriamiento de sólidos con el propósito de ir minimizando su valor tal que la probabilidad de aceptación sea modificada y de esta forma no haya un estancamiento en un mínimo local [58]).

Este algoritmo puede ser empleado para el diseño de EDOs orientados a diferentes propósitos. Sin embargo, en este capítulo nos enfocaremos en el diseño de EDOs tipo Fourier que generan arreglos rectangulares de focos. Hemos propuesto una modificación del algoritmo SA para realizar esta tarea [55, 56], donde el proceso de optimización considera la simetría del elemento similar a la del patrón de difracción deseado como se describe a continuación.

4.3.1 Restricciones por simetría

En nuestra experiencia diseñando EDOs tipo Fourier con el algoritmo SA convencional, los elementos optimizados ocasionalmente muestran una simetría similar a la del patrón de difracción deseado. Esta simetría ha sido obtenida en algunos EDOs con productos espacio-ancho de banda (SBP del término en inglés *Space-Bandwidth Product*) pequeños, optimizados en un número de iteraciones relativamente grande. Un ejemplo de esto es la distribución de fase de la celda básica de un EDO unidimensional, como se ilustra en la Fig. 4.2(a) (con 32 píxeles y 8 valores cuantizados de fase), que genera un arreglo simétrico unidimensional de 9 focos. El proceso de optimización fué llevado a cabo empleando

520,000 iteraciones distribuidas entre 100 pasos de T . La simetría de esta celda se hace manifiesta al realizarse un desplazamiento cíclico de 4 pixeles. Esta nueva distribución se muestra en la Fig. 4.2(b), la cual es simétrica alrededor del pixel $q = 17$ (es decir $M/2 + 1$).

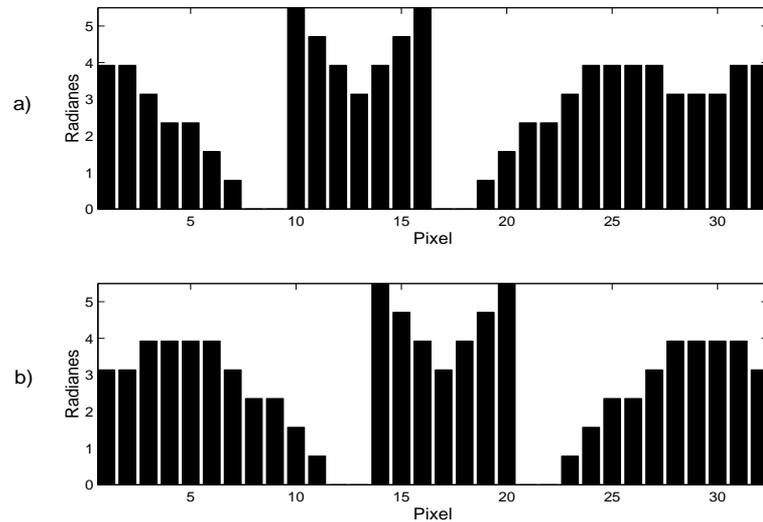


Figura 4.2: EDP unidimensional generador de arreglos de iluminación tipo Fourier diseñado con el algoritmo SA convencional: (a) celda básica de la distribución de fase del EDP optimizado, y (b) distribución de fase simétrica obtenida con un corrimiento cíclico de 4 pixeles en la celda básica optimizada.

El resultado anterior nos motivó a investigar la manera de ejecutar el algoritmo SA si la celda básica del EDO es restringida por simetría durante su optimización. Para lograr esta labor se consideró un EDO que genera un arreglo de $N \times N$ focos uniformes (con N impar) centrado en el orden cero del plano de difracción del EDO. Como puede apreciarse en la Fig. 4.3, este arreglo es simétrico en relación a los ejes horizontal, vertical y diagonales.

Para ilustrar la manera en la cual la simetría del arreglo de focos es adoptada en el plano del elemento, consideremos la celda básica de un EDO

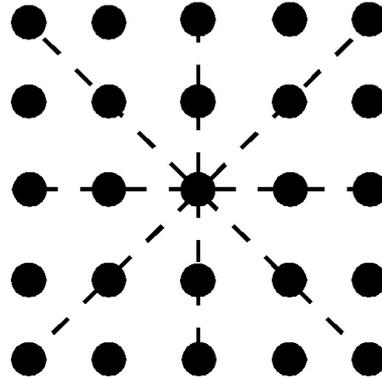


Figura 4.3: Arreglo simétrico de $N \times N$ órdenes de difracción, centrados en el orden de difracción $(0,0)$. Las líneas punteadas representan los ejes de simetría.

con 8×8 píxeles, como se muestra en la Fig. 4.4. En esta celda, el pixel $(5,5)$ es adoptado como pivote para trazar los ejes de simetría horizontal, vertical y diagonales (representado por líneas acotadas). Los píxeles que se encuentran simétricos en relación a estos ejes son sometidos a adoptar un valor de fase común. Como un ejemplo, la Fig. 4.4(a) muestra un conjunto típico de 8 píxeles simétricos (marcados con '×'). Un ejemplo más es el conjunto simétrico de píxeles respecto a los ejes de simetría vertical y horizontal (marcados con 'O'). En general, para una celda básica con $M \times M$ píxeles, adoptamos al pixel pivote con las coordenadas $(M/2 + 1, M/2 + 1)$.

4.3.2 Algoritmo SA modificado.

Los pasos del algoritmo SA, incluyendo nuestra propuesta de la restricción simétrica a un EDO durante el proceso de optimización, se presentan a continuación.

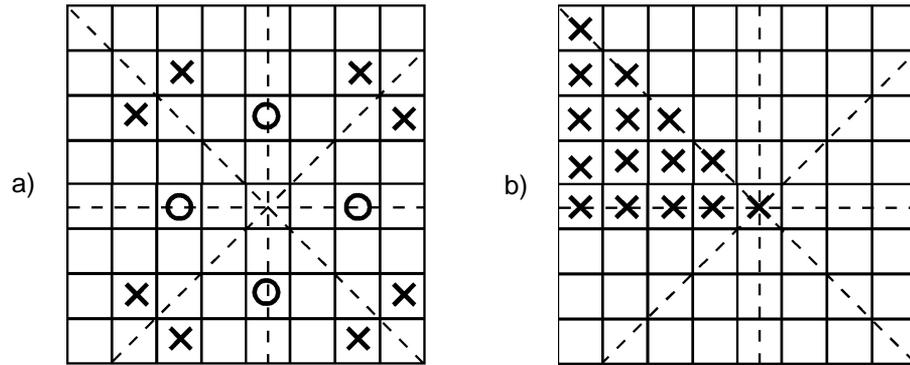


Figura 4.4: Celda básica de un EDP con 8×8 píxeles: (a) conjunto típico de 8 píxeles simétricos (marcados con 'x') y 4 píxeles simétricos sobre los ejes vertical y horizontal (marcados con 'O'). (b) Píxeles en el octante principal de la celda básica (marcados con 'x').

1. Se establece el número de focos en el área de señal deseada y el número de píxeles ($M \times M$) en la celda básica del EDP. Entonces, calculamos la función de peso ideal W_I establecida en las Ecs.(4.13) y (4.14).
2. Una distribución de fase cuantizada es generada de forma aleatoria en un octante de la celda básica, que llamamos el octante principal. Este octante está formado por los píxeles en las posiciones (n, m) con $n = 1 : M/2 + 1$ y $m = 1 : n$ (véase Fig. 4.4(b)). La celda básica se completa replicando el octante principal con respecto a los ejes de simetría, formándose la distribución de fase inicial ϕ_{nm} .
3. Se calcula la función de peso W del EDO generado en el paso 2, mediante la Ec.(4.7), y la función de costo C expresada en la Ec.(4.15).
4. Un píxel del octante principal es seleccionado de forma aleatoria, y su valor se reemplaza por un nuevo valor de fase cuantizado generado aleatoriamente. Este nuevo valor de fase cuantizado también es asignado a los píxeles que tienen

una posición simétrica (en relación a los ejes de simetría dados) con respecto al pixel anteriormente seleccionado. De este modo, la celda básica del EDO es modificada sin cambiar su simetría original.

5. La función de peso W' para la nueva distribución de fase (ϕ'_{nm}) es obtenida, y entonces una nueva función de costo C' es calculada.

6. La variación de la función de costo $\Delta C = C' - C$ se evalúa. Si $\Delta C < 0$, la nueva distribución de fase es aceptada. Si $\Delta C \geq 0$ el cambio es aceptado si la probabilidad $\exp(-\Delta C/T)$ es mayor que un número generado aleatoriamente en el dominio $[0,1]$. T es el parámetro de temperatura del algoritmo SA.

7. Si el cambio es aceptado, C es reemplazada por C' y ϕ_{nm} por ϕ'_{nm} . De otro modo, la distribución de fase anterior es restaurada.

8. Los pasos 4 al 7 se repiten en un número de iteraciones (N_I) preestablecido para cada valor de temperatura. La temperatura en la cual el proceso empieza es $T = 1$. El nuevo valor de cada temperatura es obtenido como $T = T - \Delta T$, donde $\Delta T \ll 1$.

9. El proceso de optimización termina después de que la temperatura viene a ser $T = 0$. En esta etapa, se aceptan solamente aquellos cambios que reducen la función de costo.

Los pasos 2 y 4 antes descritos corresponden a la restricción de simetría que se propone. Un diagrama de flujo de el algoritmo SA modificado se muestra en la Fig. 4.5.

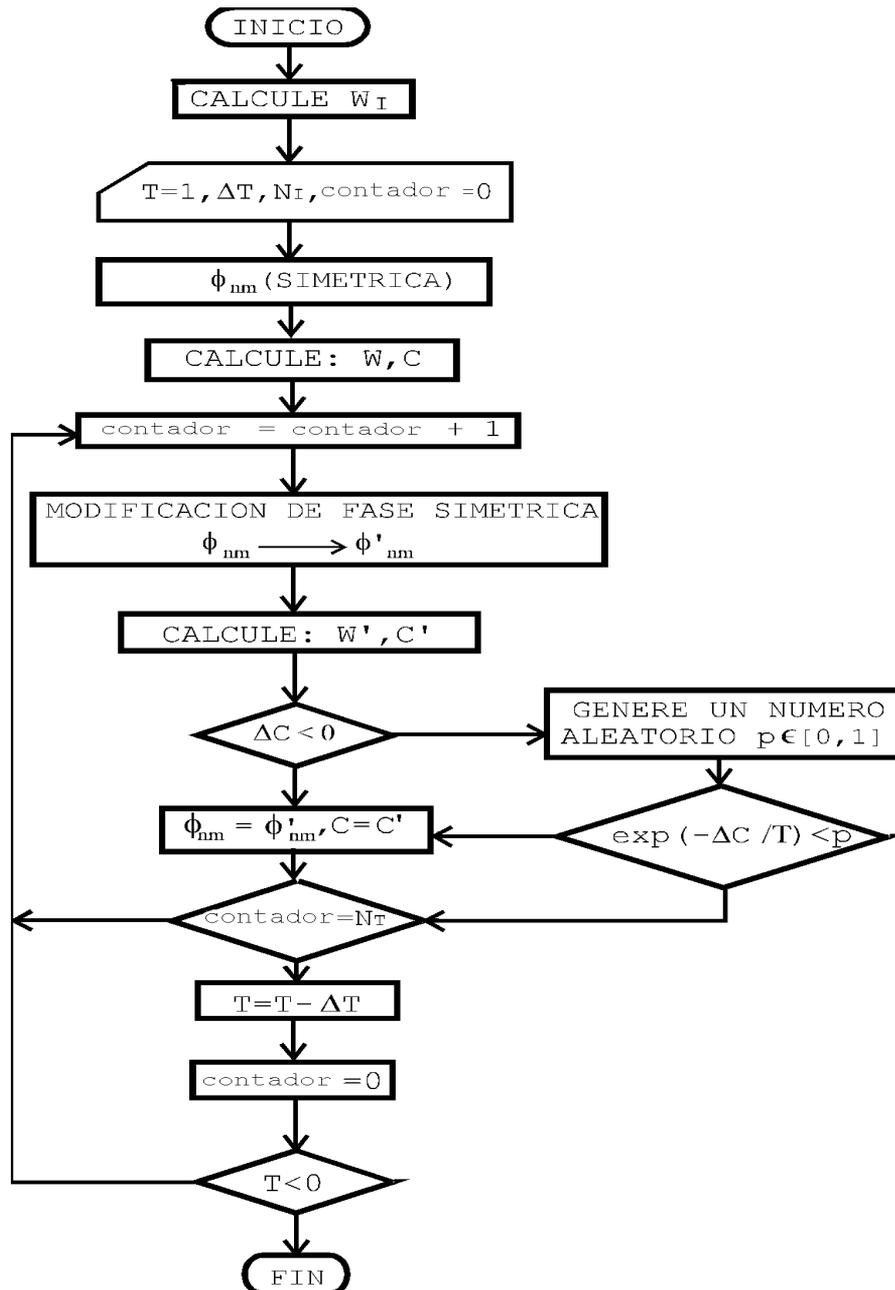


Figura 4.5: Diagrama de flujo correspondiente al algoritmo SA para optimizar EDPs con restricciones por simetría espacial.

4.4 Simulaciones y ejemplos ilustrativos.

Para ilustrar el desempeño del algoritmo SA convencional y de nuestra modificación, optimizamos algunos elementos generadores de arreglos tipo Fourier de $N \times N$ focos, específicamente, con $N = 3, 5, 7$ y 9 . La celda básica de cada elemento esta formada con 64×64 pixeles, y la distribución de fase es restringida a 8 valores cuantizados. Los diseños obtenidos con nuestro algoritmo SA modificado y el convencional, fueron optimizados empleando 512,000 iteraciones, distribuidas entre 100 pasos de T . En la Tabla 4.1 se muestran los resultados de los EDOS optimizados.

Arreglo de focos	<i>SA</i> Convencional		<i>SA</i> Modificado	
	η_S	<i>Err</i>	η_S	<i>Err</i>
3×3	79.8%	7%	82.7%	6%
5×5	83.5%	6%	87.8%	3%
7×7	85.2%	8.5%	88%	4%
9×9	85.8%	6%	88%	4.8%

Tabla 4.1: Evaluación de varios generadores de arreglos de focos diseñados con los algoritmos SA convencional y SA modificado. Los diseños emplean celdas básicas con 64×64 pixeles y 8 niveles de cuantización de fase.

Para la evaluación final de los EDOs optimizados, se considera la eficiencia de difracción total, η_S , dada por la suma de las eficiencias locales (η_{qt}), en el área de señal Ω_S . También se evalúa el error de uniformidad (*Err*) de la distribución de intensidades en el área de señal, dado por la desviación máxima de la eficiencia local (en Ω_S), normalizada con el valor promedio de la eficiencia. Considerando los ejemplos de la Tabla 4.1 (y otros ejemplos que en adelante se considerarán), nuestro algoritmo modificado provee mejores diseños en comparación con aquellos obtenidos con el procedimiento convencional. En las Figs.

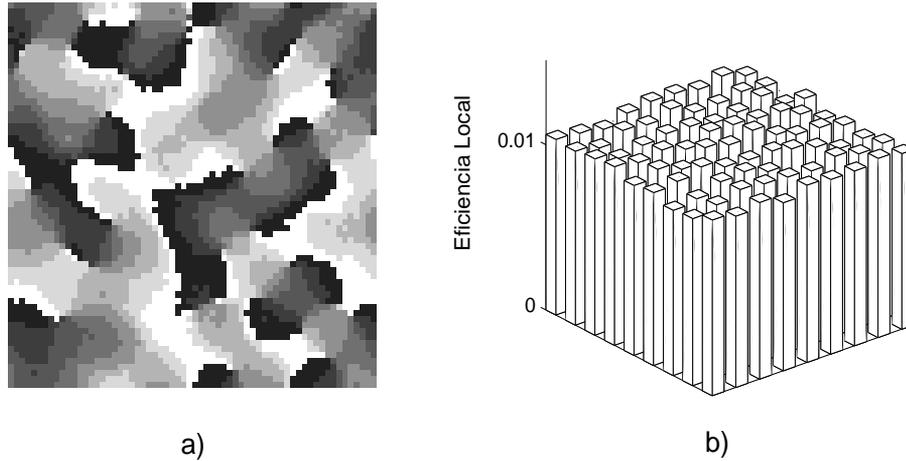


Figura 4.6: (a) Imagen a escala de grises de la distribución de fase para la celda básica del generador de un arreglo tipo Fourier de 9×9 focos, optimizado con el algoritmo SA convencional, y (b) eficiencias locales de difracción en el dominio de la señal representadas por barras.

4.6 y 4.7 se presentan los resultados obtenidos por el algoritmo SA convencional y modificado, respectivamente, para la optimización de un elemento generador de un arreglo tipo Fourier de 9×9 focos.

Como un ejemplo adicional que ilustra la efectividad de nuestro algoritmo, llevamos a cabo la optimización de un generador de arreglos de 11×11 focos, con una celda básica más grande formada por 128×128 pixeles, empleando un menor número de iteraciones (256,000). El número de niveles de fase cuantizada y de pasos de T no fué cambiado. En la Fig. 4.8 se muestra la evolución de la función de costo para el algoritmo convencional y el modificado, contra el número de iteraciones empleado.

El diseño obtenido con el algoritmo SA convencional (véase Fig. 4.9) muestra una eficiencia de difracción $\eta_S = 71\%$ y un error de uniformidad de

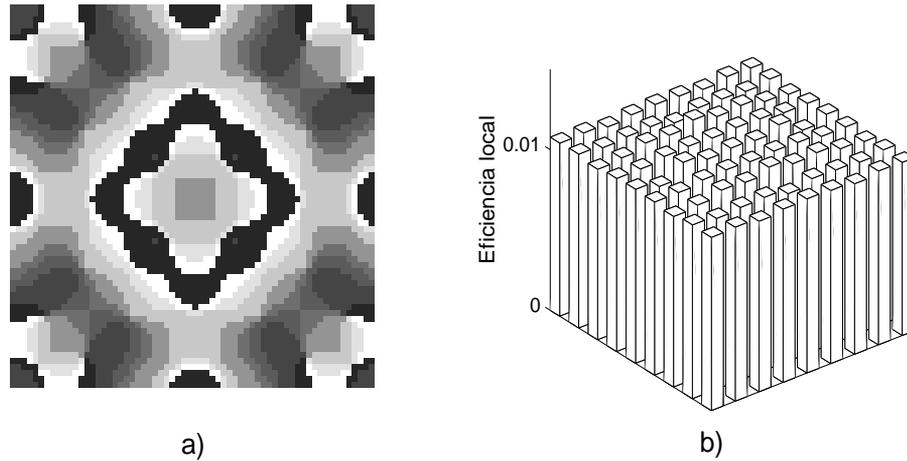


Figura 4.7: Resultados similares a los mostrados en la Fig. 4.6, empleando el algoritmo SA modificado.

$Err = 22\%$. La Fig. 4.10 muestra el diseño obtenido con el algoritmo modificado, donde la eficiencia de difracción y el error de uniformidad fueron 85.7% y 4.8% respectivamente. Para este ejemplo, y para los diferentes casos antes considerados, los EDOs restringidos por simetría espacial fueron optimizados con menor esfuerzo computacional (ver Fig. 4.8), comparados con aquellos elementos diseñados con el procedimiento convencional.

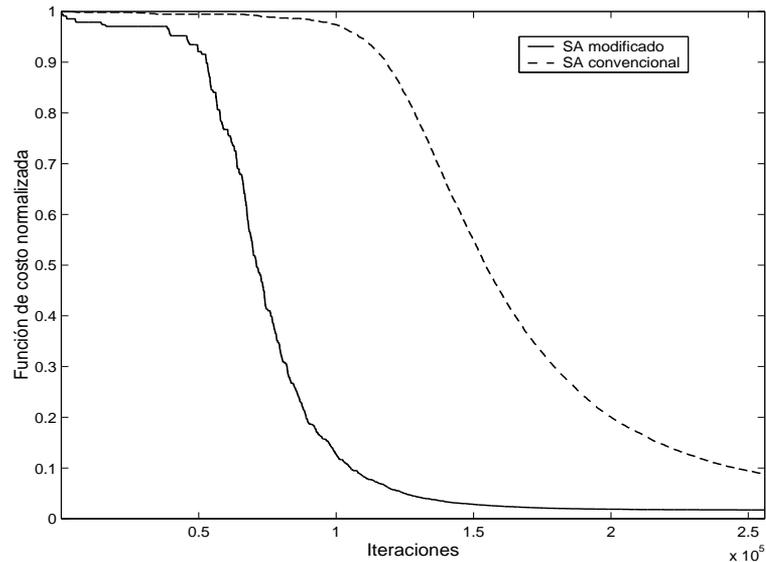


Figura 4.8: Función de costo contra número de iteraciones durante la optimización del generador de un arreglo de 11×11 focos, empleando (respectivamente) el procedimiento convencional y el modificado.

4.5 Conclusiones.

El objetivo del algoritmo SA es obtener una solución global al problema de diseño, evitando un estancamiento en un óptimo local. Durante la modificación habitual de un EDO cuantizado, con el algoritmo SA, la estructura espacial del EDO no es restringida por alguna simetría preestablecida. Por lo que cada pixel es modificado de forma independiente. Esta forma de modificación hace que el espacio de búsqueda (es decir, el número de posibles configuraciones del EDO) sea extremadamente grande. Para la clase de EDOs que consideramos en este capítulo, cuya celda básica consta de $M \times M$ pixeles y una cuantización de fase de 8 niveles, el tamaño del espacio de búsqueda viene a ser $8^{M \times M}$ pixeles. Nótese que este número es demasiado grande (considerando valores prácticos de

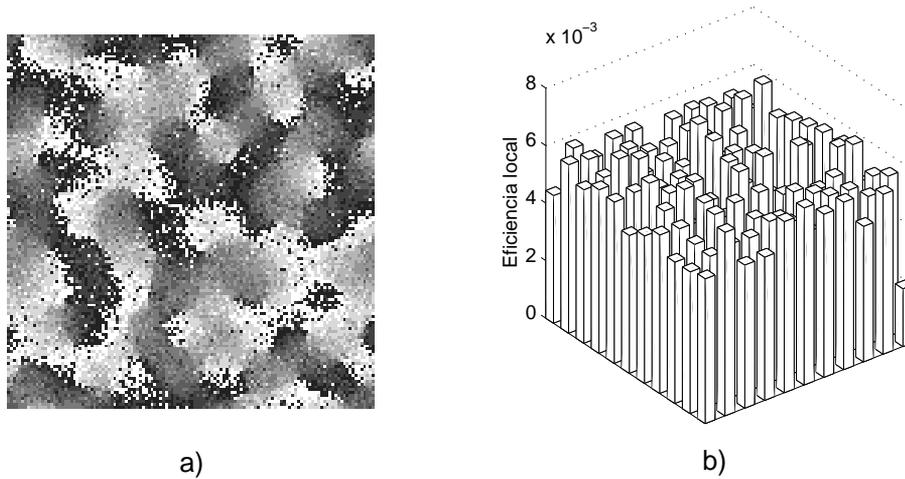


Figura 4.9: (a) Imagen a escala de grises de la distribución de fase para la celda básica del generador de un arreglo tipo Fourier de 11×11 focos, optimizado con el algoritmo SA convencional, y (b) eficiencias locales de difracción en el dominio de la señal representadas por barras.

M), comparado con el número de iteraciones que puede razonablemente realizar una computadora. De modo que, si el número de iteraciones no es lo suficientemente grande, es posible que el óptimo global quede escondido en una porción grande del espacio de soluciones que no es explorado durante la optimización.

Hemos modificado el algoritmo SA con el propósito de diseñar EDOs cuya distribución de fase es sometida a una restricción espacial de simetría similar a la del campo de reconstrucción deseado. Una característica importante de nuestro método es que el espacio de búsqueda se reduce aproximadamente a $8^{(M \times M)/8}$. Lo que significa que el espacio de búsqueda para la optimización con el algoritmo convencional SA es $8^{7(M \times M)/8}$ veces más grande que el espacio de búsqueda para nuestro procedimiento que emplea restricciones por simetría. La reducción en el espacio de búsqueda en el último caso conduce a una significativa reducción del

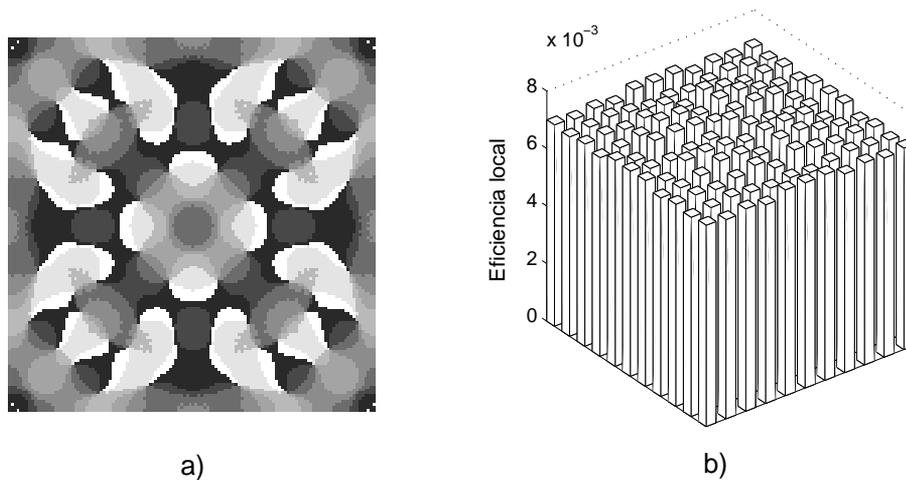


Figura 4.10: Resultados similares a los mostrados en la Fig. 4.9, empleando el algoritmo SA modificado.

esfuerzo computacional requerido. Esta ventaja tiene suma importancia para los elementos con SBP grande.

Es notable que nuestro método fallaría en la convergencia de un óptimo global si este estuviera localizado en el subconjunto de configuraciones sin simetría. Sin embargo, para los ejemplos que hemos considerado, los diseños simétricos son mejores que aquellos obtenidos con la búsqueda convencional. Este resultado nos revela que el espacio de búsqueda restringido por simetría probablemente contiene la solución global, o que provee soluciones que están muy cercanas al óptimo global.

Capítulo 5

Diseño electro-óptico de EDPs tipo Fourier

Se propone un método electro-óptico que emplea un sistema óptico retroalimentado construido alrededor de un elemento difractivo pixelizado dinámico, (una pantalla de cristal líquido tipo TN como SLM). A diferencia del método digital, el método electro-óptico tiene la capacidad de compensar los defectos del modulador empleado. En consecuencia, los EDPs optimizados con este método presentan una mejor reconstrucción experimental en comparación con aquellos calculados solamente por computadora. Algunos ejemplos ilustrativos experimentales que lo demuestran son presentados.

5.1 Introducción.

La codificación de EDPs puede llevarse a cabo empleando una LCD acondicionada para operar como un SLM. Sin embargo, debido a los defectos que presentan este tipo de dispositivos, con frecuencia la obtención de la imagen de reconstrucción suele ser deficiente. Los errores de fase resultantes de una inadecuada planicidad en la LCD han sido compensados sumergiendo la pantalla en una solución líquida [44]. Recientemente también se han desarrollado dispositivos electrónicos para compensar las imperfecciones en este tipo de moduladores [45]. Un procedimiento alternativo para disminuir el ruido en el área de la señal de reconstrucción ha sido implementado codificando elementos que manipulan la imagen fuera de eje [47].

La solución que hemos implementado para compensar las deficiencias que presenta una LCD al codificar EDPs tipo Fourier, se basa en el desarrollo de un método de optimización que emplea un sistema electro-óptico retroalimentado (Computadora-LCD-CCD-Computadora, ver Fig. 5.2). La función de este método consiste en optimizar directamente la función de fase del EDP codificado. En este procedimiento, los defectos del modulador empleado son considerados y compensados, dando como resultado una imagen reconstruida mucho más cercana a la deseada en comparación con la obtenida usando solamente el diseño resultante con la computadora. Takaki et al [59] emplearon un procedimiento similar para optimizar la función de punto extendido de una lente activa que combina una lente física con un dispositivo de cristal líquido. Por otro lado, la optimización de EDPs tipo Fourier de fase binaria, empleando un sistema electro-óptico que incluye una LCD ferroeléctrica, fué implementado recientemente [60].

Como caso particular, en este Capítulo presentamos un método electro-óptico que emplea una LCD tipo TN para la optimización de EDPs de fase multinivel que generan arreglos de iluminación tipo Fourier. Este método electro-óptico es implementado en base al algoritmo de optimización SA y al igual que en el procedimiento de diseño digital, ha sido adaptado para la generación de EDPs con distribución de fase simétrica; lo cual, nos permite una disminución en tiempo de cálculo (como se comprobó en el Capítulo anterior para el procedimiento de diseño digital). Adicionalmente, este procedimiento es capaz de encontrar una solución partiendo de una solución inicial aleatoria o precalculada. En la sección 5.2 se describen brevemente las implicaciones que representa el empleo de la estructura de una LCD en el diseño de un generador de arreglos de iluminación tipo Fourier. La sección 5.3 describe en detalle el procedimiento electro-óptico de optimización propuesto. Una comparación del desempeño experimental entre los EDPs calculados usando solo simulación computacional y aquellos resultantes de la implementación del procedimiento electro-óptico, es presentada mediante algunos ejemplos ilustrativos en la sección 5.4. Finalmente, en la sección 5.5 se presentan las conclusiones.

5.2 Generadores de arreglos de iluminación empleando una LCD.

Consideremos un EDP periódico con una estructura similar a la de una LCD como la que se muestra en la Fig. 5.1. La celda básica de este EDP esta formada por un arreglo de $M \times M$ pixeles cuadrados, donde, ϕ_{nm} representa el retardo de fase correspondiente al pixel (n, m) . Los tamaños laterales del pixel y

de su área activa se denotan por p y a , respectivamente. Sin perder generalidad, la extensión lateral de la celda básica puede ser normalizada a uno, de modo que la distancia entre pixeles es $p = 1/M$. La estructura completa del EDP se forma por $L \times L$ réplicas de la celda básica.

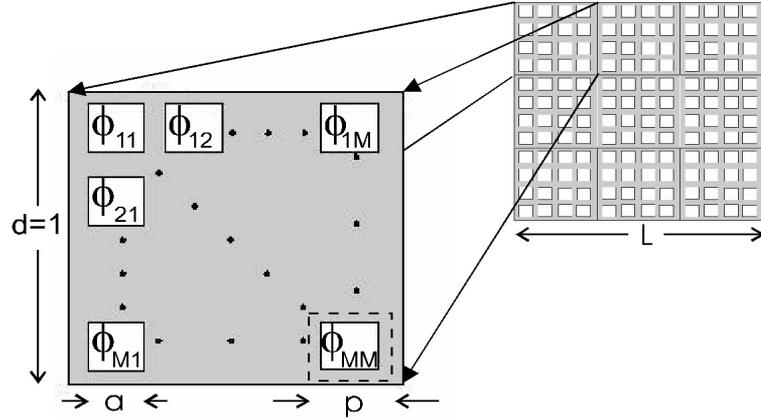


Figura 5.1: Estructura periódica de un EDP generador de arreglos de iluminación empleando una LCD.

El campo de difracción de este EDP puede ser representado por:

$$T(u, v) = \sum_{q, l=-\infty}^{\infty} E(q, l)W(q, l)S(u - q, v - l). \quad (5.1)$$

Obsérvese que la Ec.(5.1) es similar a la Ec.(4.5), presentada en el Capítulo anterior, con la única diferencia que la función envolvente $E(q, l)$ es ahora dada como

$$E(q, l) = \text{sinc}(q\sqrt{r_a}/M)\text{sinc}(l\sqrt{r}/M), \quad (5.2)$$

donde, $r_a = (a/p)^2$, es la razón de abertura bidimensional dada entre el área

activa y el área total del pixel de la LCD. Como $r < 1$ los cruces por cero de la envolvente $E(q, l)$ no coinciden con los órdenes de difracción (q, l) . Consecuentemente, una reducción en la eficiencia de difracción total se presenta debido a la presencia de réplicas distorsionadas con una fracción de energía significativa en el campo de reconstrucción [18].

5.3 Optimización electro-óptica.

El procedimiento electro-óptico de diseño que aquí presentamos se basa en el algoritmo SA y fué adaptado para generar EDPs con restricciones por simetría (para ver más detalles acerca de este algoritmo véase Capítulo 4). A diferencia del caso totalmente digital, en el procedimiento electro-óptico un sistema óptico se emplea para obtener la operación de transformación de Fourier. La distribución de fase de la LCD es controlada con una computadora, y el patrón de difracción en intensidad es capturado por una cámara CCD y guardado en un espacio de memoria de la computadora. La computadora realiza los cambios en la distribución de fase del elemento de forma dinámica y evalúa, mediante una rutina, la aceptación del cambio realizado de acuerdo al criterio de aceptación del algoritmo SA. El proceso es repetido iterativamente mientras el parámetro T sea mayor o igual a cero. Durante el proceso, los defectos que se presentan tanto por parte del sistema óptico así como los de la LCD son compensados. De manera que el sistema electro-óptico resultante, cuyo esquema se muestra en la Fig. 5.2, es controlado mediante la retroalimentación de la información obtenida en el plano de difracción.

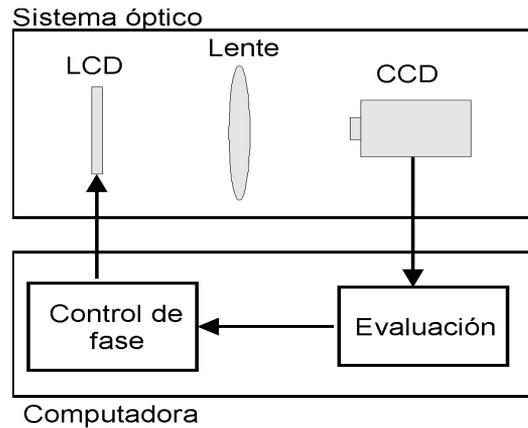


Figura 5.2: Diagrama esquemático del sistema de optimización electro-óptica.

5.3.1 Modificaciones en la distribución de fase de la LCD.

En este método electro-óptico se considera la capacidad que poseen las LCDs para ser reconfigurables en tiempo real por medio de una señal eléctrica, por lo que las modificaciones en la distribución de fase de nuestro EDP (ahora reconfigurable) se realizan de forma dinámica.

Empleando los valores de fase cuantizados de una LCD previamente caracterizada, como se describió en el Capítulo 2, el procedimiento electro-óptico principia con el despliegue de una distribución de fase inicial. Durante el procedimiento, los cambios en la distribución de fase del elemento codificado pueden realizarse de forma totalmente aleatoria o con restricciones por simetría.

Considerando las ventajas que representa la optimización de EDOs restringidos por simetría (expuesto en el capítulo 4), el proceso electro-óptico que empleamos fué adaptado para optimizar EDOs cuya distribución de fase se restringe a una simetría similar a la del campo de reconstrucción deseado.

5.3.2 Medición y evaluación de la imagen reconstruída.

Para compensar las variaciones temporales en la imagen reconstruída, debido a la frecuencia de barrido de la LCD (60 Hz) y a otras fuentes de ruido, por cada iteración se realizaron 6 lecturas con la CCD en períodos de tiempo aleatorio (milisegundos). En consecuencia, la imagen resultante se compone de los valores promedio en relación a las 6 lecturas realizadas. Los valores de la imagen resultante son guardados en un espacio de memoria.

Para la evaluación de las modificaciones realizadas al elemento, durante el procedimiento, se leen únicamente los valores de una red de puntos o píxeles de interés sobre la imagen capturada por la CCD y guardada en memoria. Esta red de píxeles indica la ubicación de los valores picos de todos los posibles órdenes de difracción que pueden ser capturados con la CCD. Particularmente, esta red de píxeles la obtenemos codificando un elemento periódico en la LCD, cuya función es la de concentrar la mayor parte de la luz difractada en un arreglo de $N \times N$ focos que ocupan el área completa de detección de la CCD. El diseño inmediato de la celda básica del EDP con el que obtenemos tal conjunto de órdenes se calcula a partir de la solución parageométrica, cuya versión muestreada bidimensional se expresa como [61]:

$$\phi_{nm} = -N\pi(n^2 + m^2)/M^2, \quad (5.3)$$

siendo M^2 igual al número de píxeles en la celda básica del EDP.

Al inicio del proceso, la computadora guarda en un espacio de memoria la ubicación de la red de píxeles en forma de un vector de datos que hemos denominado “vector índice”.

Un vector de datos adicional en memoria, que aquí llamamos “vector patrón”, de la misma dimensión que el vector índice es creado con los valores del arreglo deseado (es decir, los valores pico deseados en cada foco). En una iteración, se realizan lecturas en los puntos de interés de la imagen resultante acudiendo a la información que se encuentra en el vector índice. A partir de esta lectura se genera el “vector resultante” que contiene los datos experimentales de la imagen o patrón de difracción resultante. De manera que, en la práctica la computadora evalúa los cambios generados en la distribución de fase del elemento comparando al vector resultante con el vector patrón. El tiempo de cálculo hecho por la computadora de esta forma puede ser reducido. El tiempo estimado que tiene una iteración es de aproximadamente 900 ms.

La función de costo, C , asociada a este procedimiento se define como

$$C = \sum |[V_P] - \alpha[V_R]|^2, \quad (5.4)$$

donde $[V_R]$ es el vector resultante que representa al patrón de difracción en intensidad correspondiente al elemento real, $[V_P]$ es el vector patrón que representa al patrón de difracción en intensidad correspondiente al elemento ideal y α es un factor de escala dado por

$$\alpha = \frac{\sum[V_P]}{\sum_{q,l}[V_R]}. \quad (5.5)$$

El procedimiento de optimización electro-óptico intenta entonces minimizar la función de costo definida por la Ec.(5.4). El esquema de temperatura empleado para este procedimiento es el mismo que para el caso totalmente digital.

5.4 Ejemplos ilustrativos experimentales.

El sistema electro-óptico experimental empleado se ilustra en la Fig 5.3, donde la luz que emana de una fuente de luz laser (632.8 nm) es colimada e ilumina la LCD. El patrón de difracción en intensidad de cada elemento codificado es capturado por una CCD colocada en el plano focal de una lente transformadora de Fourier.

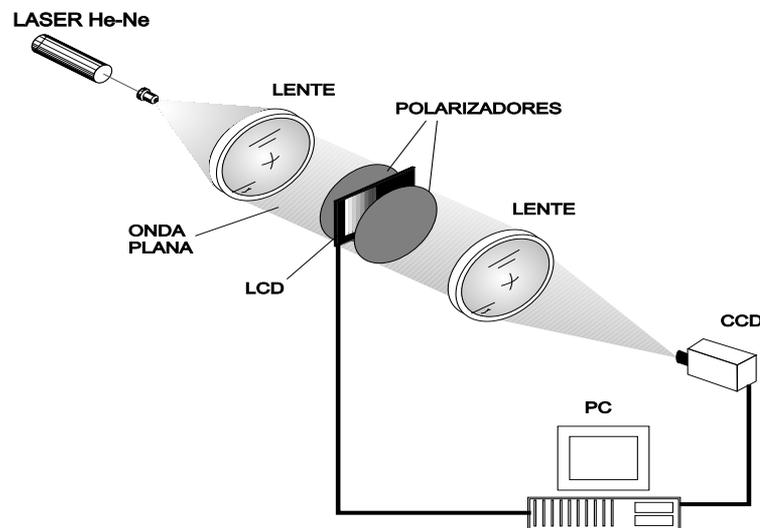


Figura 5.3: Sistema electro-óptico experimental con su lazo de retroalimentación.

Los diseños que a continuación se presentan fueron calculados para ser codificados en la LCD Kopin 320.

Primeramente fueron diseñados mediante simulación computacional, un par de EDPs que generan un arreglo simétrico de 5×5 focos, uno centrado en eje (en el orden $(0, 0)$) y otro centrado fuera de eje (en el orden $(3, 3)$). La celda básica de cada elemento consta de 16×16 píxeles y su distribución de fase fué

restringida a 8 valores cuantizados.

Ambos diseños fueron codificados en la LCD y evaluados experimentalmente. La eficiencia de difracción experimental, η_e , en cada diseño se calculó como la razón de la intensidad integrada en el área de señal con la intensidad integrada de luz transmitida por la LCD. Por otro lado, el error experimental (E_{exp}) en la uniformidad de cada arreglo resultante fué calculado como la máxima desviación entre los valores picos en intensidad en cada foco, normalizado con su valor promedio.

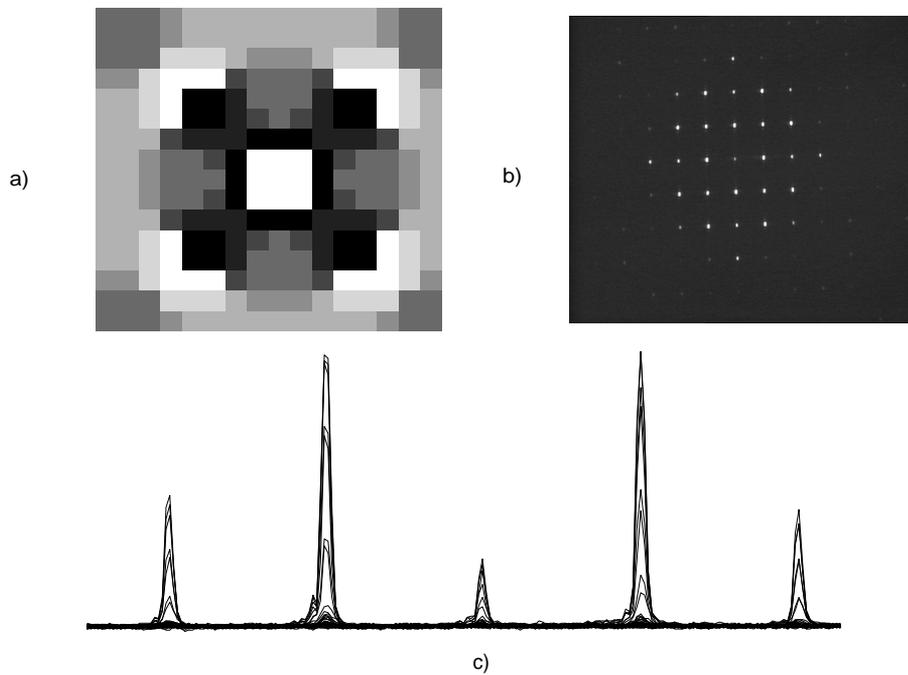


Figura 5.4: Diseño digital de un EDP generador de 5×5 focos centrados en $(0,0)$: (a) Imagen a escala de grises de la distribución de fase en la celda básica, (b) Imagen experimental en el plano de difracción, y (c) perfil de intensidades a lo largo de la fila central del conjunto de focos en el área de señal.

El diseño digital en eje resultante, cuya distribución de fase se muestra

en la Fig. 5.4(a), mostró una eficiencia de difracción experimental $\eta_e = 37.3\%$ y un error de uniformidad $E_{exp} = 62.6\%$. En las Figs. 5.4 (b) y (c) se ilustra la imagen del patrón de difracción resultante y el perfil de intensidades a lo largo de la fila central del conjunto de focos en el área de señal, respectivamente.

Por otro lado, el diseño digital fuera de eje al ser implementado experimentalmente presentó una eficiencia de difracción $\eta_e = 51.7\%$ y un error de uniformidad $E_{exp} = 20.6\%$. El patrón de difracción en intensidad resultante y el perfil de intensidades a lo largo de la fila central del conjunto de focos en el área de señal son mostrados en la Fig. 5.5 (b) y (c), respectivamente.

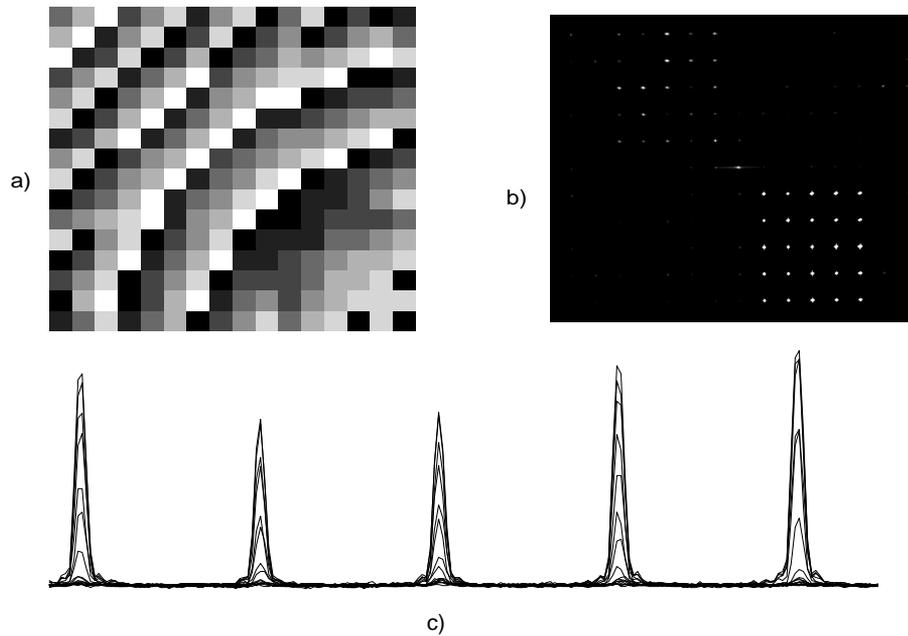


Figura 5.5: Diseño digital de un EDP generador de 5×5 focos centrados en (3,3): (a) Imagen a escala de grises de la distribución de fase en la celda básica, (b) Imagen experimental en el plano de difracción, y (c) perfil de intensidades a lo largo de la fila central del conjunto de focos en el área de señal.

Como puede observarse en ambos casos, la reconstrucción del campo de

difracción experimental resultante es deficiente. Para el diseño en eje se observa un alto error de uniformidad en el arreglo de focos resultante. Por otro lado, el error de uniformidad en el arreglo obtenido con el diseño fuera de eje es significativamente menor. La deficiente reconstrucción en ambos casos se debe a imperfecciones presentes en la LCD. Entre las imperfecciones presentes en la LCD empleada se encuentra un error entre la fase que se codifica y la que realmente modula la LCD, la cual afecta al patrón de reconstrucción presentando una pseudoimagen conjugada (véase parte superior en la imagen de la Fig. 5.5(c)). En el caso del diseño en eje este inconveniente se manifiesta en un alto error de uniformidad. Un estudio detallado acerca de la influencia de este error de fase se presenta en [62].

Un par de diseños similares a los presentados anteriormente fueron realizados con el procedimiento electro-óptico, usando como solución inicial la solución resultante del procedimiento digital. Para ambos diseños se emplearon un total de 5000 iteraciones. La fig. 5.6(a) presenta en una imagen a escala de grises la distribución de fase resultante para el diseño centrado en eje, el cual mostró una eficiencia de difracción y un error de uniformidad experimental de 53.7% y 14%, respectivamente. Las Figs. 5.6 (b) y (c) muestran al arreglo de focos resultante y el perfil de intensidades a lo largo de la fila central del conjunto de focos en el área de señal, respectivamente.

El diseño fuera de eje, cuya distribución de fase se muestra en la Fig. 5.7(a), presentó una eficiencia de difracción experimental de 52.2% y un error de uniformidad del 15%. La Fig. 5.7(b) presenta el arreglo de focos resultante y un perfil de intensidades a lo largo de la fila central del conjunto de focos en el área de señal se muestra en la Fig. 5.7(c).

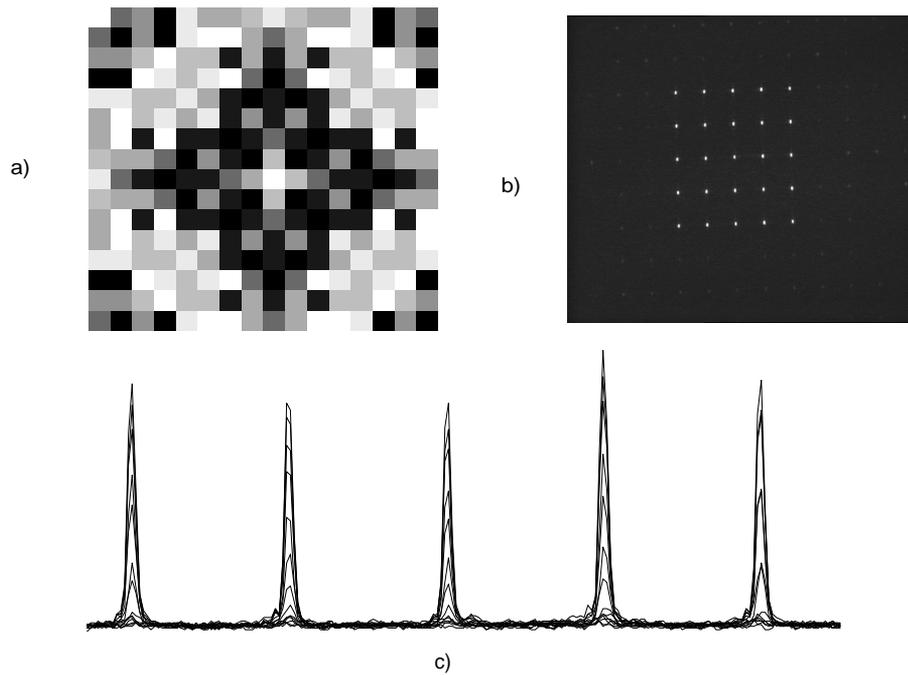


Figura 5.6: Resultados similares a los presentados en la Fig. 5.4, usando el procedimiento de diseño electro-óptico.

Adicionalmente, presentamos el diseño electro-óptico de un elemento generador de un arreglo de 9×9 focos centrados en eje. La distribución de fase inicial que empleamos para este caso fué generada de manera simétrica, como se describe en el Capítulo 4. La celda básica de este elemento, presentado en la Fig. 5.8(a), consta de 24×24 pixeles y esta cuantizada a 8 valores de fase. Después de 10000 iteraciones obtuvimos el diseño con una eficiencia experimental de 54.7% y un error de uniformidad del 11%. El arreglo de focos resultante y un barrido lateral a lo largo de la fila central del arreglo de focos en el área de señal son presentados en las Figs. 5.8(a) y (b), respectivamente.

Como puede apreciarse nuestro método de diseño electro-óptico no solo

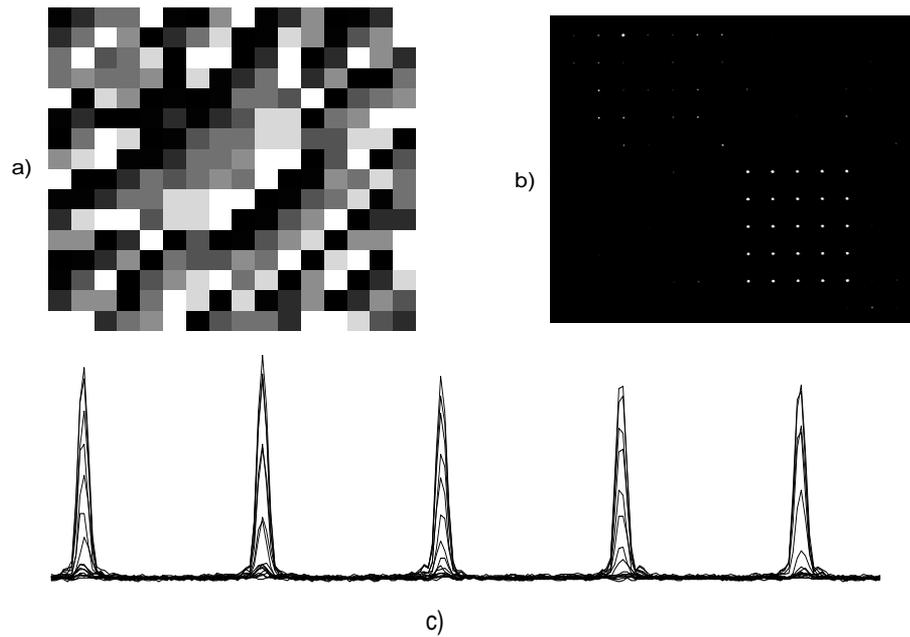


Figura 5.7: Resultados similares a los presentados en la Fig. 5.5, usando el procedimiento de diseño electro-óptico.

puede generar un mejor diseño partiendo de una solución previa, sino que puede partir de una solución arbitraria entregando un diseño que produce una buena reconstrucción.

5.5 Conclusiones.

En este capítulo se presentó un método electro-óptico para el diseño de EDPs generadores de arreglos de iluminación tipo Fourier codificados en una LCD tipo TN. Aún cuando este método resulta ser lento en comparación con el método totalmente digital, tiene la capacidad de compensar los defectos del modulador empleado (en este caso la LCD) y aquellos defectos que pudieran pre-

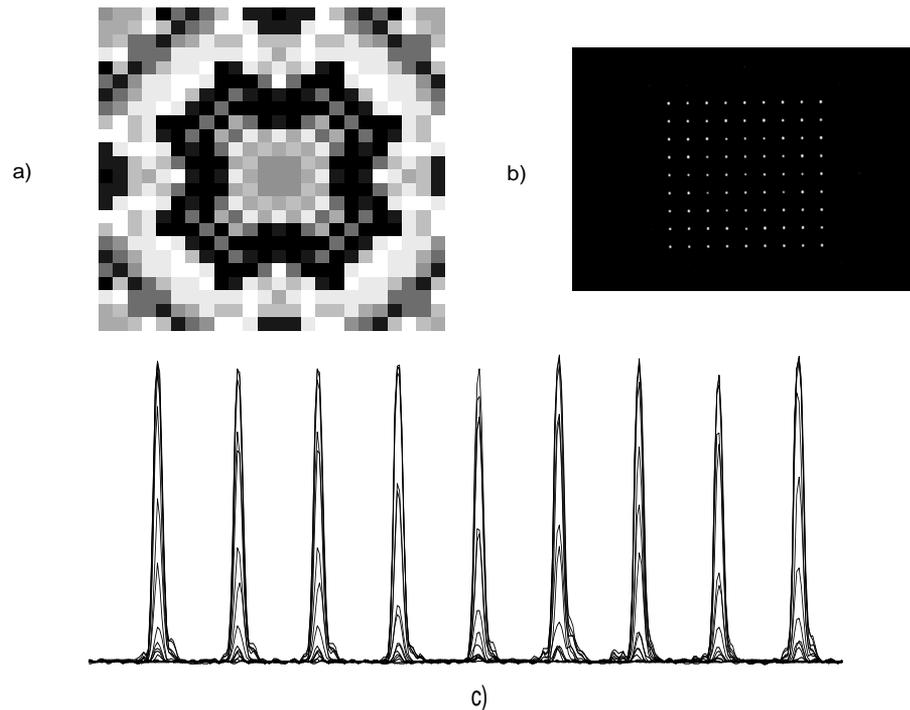


Figura 5.8: Diseño electro-óptico de un EDP generador de 9×9 focos centrados en $(0,0)$: (a) Imagen a escala de grises de la distribución de fase en la celda básica, (b) Imagen experimental en el plano de difracción, y (c) barrido lateral a lo largo de la fila central del arreglo de focos en el área de señal.

sentarse por el sistema óptico. Este método de diseño se basa en el algoritmo SA y fué adaptado para someter nuestros diseños a restricciones por simetría. Consecuentemente, se empleó un número de iteraciones razonablemente reducido. Otro aspecto importante de este método es la reducción en el tiempo de cálculo cuando en lugar de realizar lecturas sobre la imagen completa, se realizan lecturas en una red de pixeles de interés que cubren las posiciones en los picos de todos los posibles focos capturables en una imagen por la CCD. Los diseños resultantes con el procedimiento electro-óptico, comparados con los obtenidos mediante el procedimiento digital, presentan un campo de reconstrucción ex-

perimental más cercano al deseado. Finalmente, con este procedimiento no solamente se puede mejorar los diseños obtenidos digitalmente, sino se pueden obtener buenos diseños apartir de una solución inicial arbitraria.

Capítulo 6

EDPs reconfigurables con propiedades de autoenfocamiento.

Se propone la realización de EDPs reconfigurables con propiedades de autoenfocamiento, es decir, prescindiendo del uso de una lente transformadora. La generación de EDPs autoenfocables de fase es llevada a cabo con una LCD al multiplicar la función de fase de una LP con la función de fase de un EDP tipo Fourier. Los elementos resultantes son implementados experimentalmente y su desempeño es comparado con el de aquellos que son implementados convencionalmente empleando un sistema óptico que incluye una lente refractiva transformadora.

6.1 Introducción.

El campo de reconstrucción de un EDO, diseñado para operar en el régimen de Fraunhofer, es usualmente obtenido mediante el empleo de sistemas ópticos que incluyen una lente refractiva transformadora. La implementación de hologramas con propiedades de autoenfocamiento; es decir, que pueden reconstruir imágenes prescindiendo del uso de una lente refractiva, ha sido recientemente reportado [63, 64]. Estos elementos fueron creados empleando técnicas de holografía generada por computadora tipo “*detour*” [3], multiplicando un factor de fase cuadrático por el espectro de un objeto. Como ya se había mencionado, en la introducción a este trabajo de tesis, el inconveniente en el uso de esta técnica es la generación de elementos difractivos con muy baja eficiencia de difracción y baja razón señal a ruido. En este Capítulo proponemos una novedosa forma de crear EDPs de fase autoenfocables como resultado de la multiplicación de la función de fase de una LP con la función de fase de un EDP tipo Fourier [65]. Además, el empleo de una LCD en su modo de modulación mayormente en fase nos permite la implementación de este tipo de elementos compuestos en tiempo real. De esta forma es posible darles a este tipo de elementos el carácter adicional de reconfigurables, lo cual, representa una ventaja frente a la no reconfigurabilidad de los EDOs fabricados con técnicas convencionales. Otra ventaja que se presenta es la posibilidad de ajustar en tiempo real la distancia del plano al cual se desea obtener el campo de reconstrucción de un EDP autoenfocable. Tal ajuste no puede ser realizado con EDPs tipo Fourier implementados convencionalmente, ya que la distancia de su plano de reconstrucción depende de la longitud focal fija de una lente refractiva.

La teoría en la que se fundamenta la operación de los EDPs autoen-

focables de fase se presenta en la sección 6.2. En la sección 6.3, mediante el empleo de una LCD, se presenta la implementación de algunos ejemplos experimentales que ilustran el funcionamiento de los EDPs autoenfocables y una comparación de su desempeño con el de los EDPs tipo Fourier implementados convencionalmente. Finalmente, la sección 6.4 presenta las conclusiones.

6.2 EDPs autoenfocables.

Como se describió en el Capítulo 3, el grado de apodización en el foco principal de una LP es dependiente principalmente de la razón denotada por

$$r = Nap/\lambda z, \quad (6.1)$$

donde, N = número de pixeles, a = tamaño lateral del pixel, p = distancia entre pixeles, λ = longitud de onda de la luz empleada, y z = distancia de focalización.

Fijando los parámetros $N = 319$ pixeles, $a = 12\mu m$, $p = 15\mu m$ y $\lambda = 632.8nm$, presentamos algunas simulaciones numéricas para comparar el foco de una lente continua y el foco principal de una LP. Primeramente, se realizaron calculos considerando un valor de $r = 2$, valor para el cual se tiene el máximo grado de apodizado (como se aprecia en la Fig. 6.1(a)), a partir de la distancia focal de $z = 4.5cms$. Por otro lado, sabemos que si el valor de z es suficientemente grande sabemos que el foco principal de la LP será similar a la de una lente continua. Considerando tal caso, en la Fig. 6.1(b) se presenta una gráfica que empalma el foco de una lente continua con el foco principal de una LP, donde, $z = 40cms$ y $r \approx 0.22$. Bajo estas condiciones, este comportamiento nos sugiere el empleo de una LP como una lente transformadora de Fourier.

Combinando la función de fase de una LP con la función de fase de un EDP tipo Fourier es posible crear un elemento compuesto con la capacidad de reconstruir un patrón deseado a una distancia z dada. El campo de reconstrucción de tal elemento compuesto puede ser calculado considerando la expresión simplificada del campo de Fresnel de un EDP, la cual se presentó en el Capítulo 3 y que es dada como:

$$U(x) = \frac{a}{\sqrt{\lambda z}} \exp\left[\frac{i\pi x^2}{\lambda z}\right] \sum_{n=-Q}^Q \exp[i\phi_n] \exp\left[\frac{i\pi n^2 p^2}{\lambda z}\right] \exp\left[\frac{-i2\pi xnp}{\lambda z}\right] \times \text{sinc}\left[\frac{a}{\lambda z}(x - np)\right]. \quad (6.2)$$

La distribución de fase, ϕ_n , en la Ec.(6.2) corresponde en este caso a

$$\phi_n = [\phi_{LP} + \phi_{EDTF}] \pmod{2\pi}, \quad (6.3)$$

donde, ϕ_{LP} representa la distribución de fase de la LP y ϕ_{EDTF} a la distribución de fase del elemento difractivo tipo Fourier.

Considerando la Ec.(6.2) presentamos una simulación numérica del campo de reconstrucción de un EDP autoenfocable (cuantizado a 8 niveles de fase, véase Fig. 6.2(c)). Este elemento fué creado apartir de la adición de la distribución de fase de la LP (ver Fig. 6.2(a)), cuyo correspondiente foco principal fué ilustrada en la Fig. 6.1(b) ($z = 40\text{cms}$), con la distribución de fase de un EDP generador de un arreglo de iluminación tipo Fourier (ver Fig. 6.2(b)). El campo de reconstrucción resultante de esta simulación numérica se muestra en la Fig. 6.2(d).

La eficiencia de difracción para este elemento, calculada como la razón

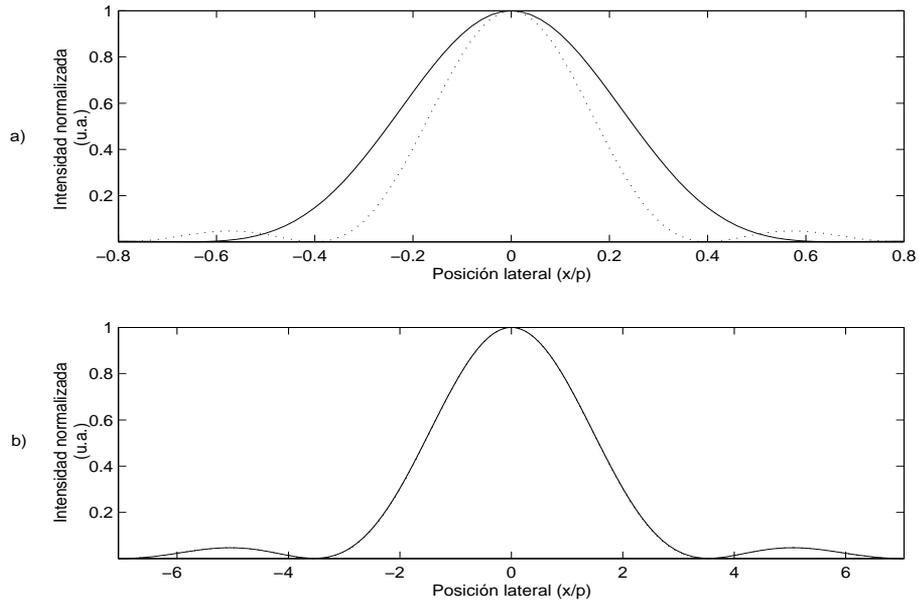


Figura 6.1: Foco principal de una lente pixelizada (curva sólida) y foco de una lente continua (curva segmentada): (a) en $z = 4.5\text{cms}$, y (b) en $z = 40\text{cms}$.

de la intensidad integrada en el área de señal (el arreglo de 9 focos) con la intensidad integrada de luz transmitida por el elemento, fue del 73% y un error de uniformidad del 6%.

Basado en está explicación teórica de la operación de un EDP autoenfocable, en la siguiente sección presentamos el diseño bidimensional y la implementación experimental de este tipo de elementos empleando una LCD.

6.3 Ejemplos e implementación experimental.

Para los ejemplos experimentales que a continuación se presentan, se diseñaron EDPs tipo Fourier mediante una versión modificada del algoritmo

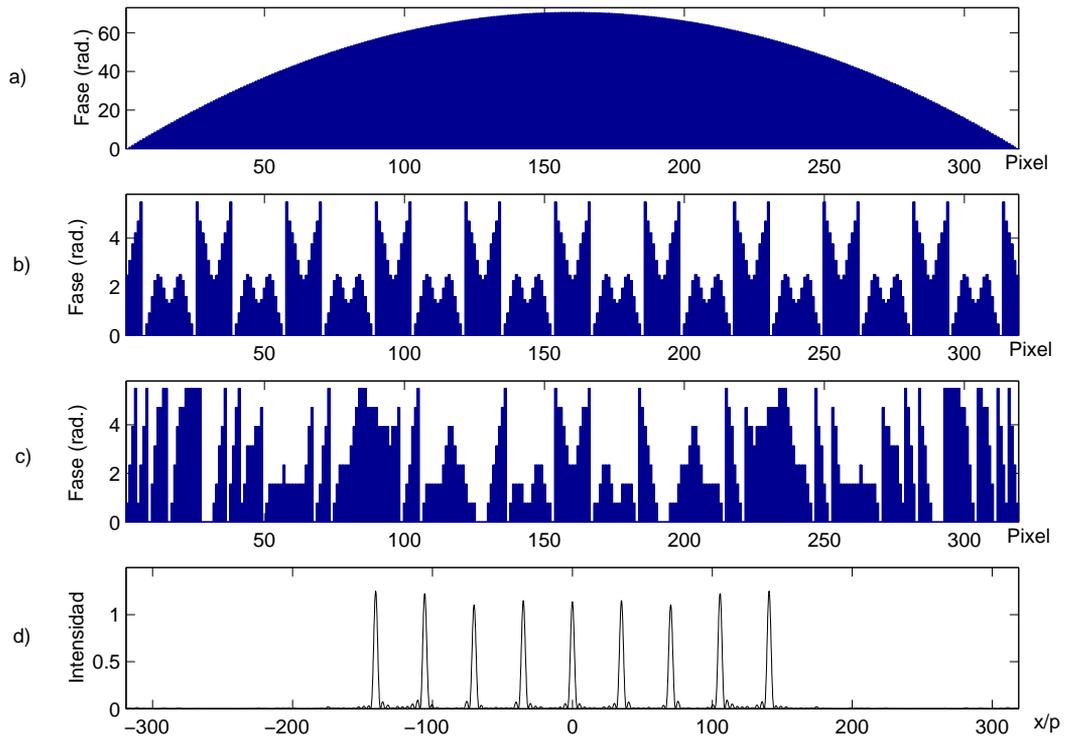


Figura 6.2: EDP autoenfocable generador de un arreglo de 1×9 focos: a) distribución de fase de una LP, b) EDP tipo Fourier, c) EDP resultante cuantizado a 8 niveles de fase y d) campo de reconstrucción.

Fienup [6] (para detalles de este algoritmo véase Apéndice D). Estos EDPs fueron primeramente implementados convencionalmente con un sistema óptico que emplea una lente refractiva transformadora de Fourier. Por otro lado, la distribución de fase de cada EDP tipo Fourier fué empleada en conjunto con la distribución de fase de una LP, para formar EDPs autoenfocables. La implementación y codificación de estos elementos fué realizada aprovechando la reconfigurabilidad y la programabilidad de la LCD Kopin 320, por lo que todos los elementos constan de un total de 320×240 pixeles y están cuantizados a 8 niveles de fase.

El primer ejemplo que se presenta es un elemento generador de un arreglo de iluminación fuera de eje de 5×5 focos. El diseño del EDP periódico tipo Fourier (véase Fig. 6.3(a)) tiene una celda básica formada de 16×16 pixeles.

La reconstrucción experimental de este elemento, en forma convencional, generó el patrón de difracción en intensidad mostrado en la Fig. 6.3(b). En la Fig. 6.3(c) se presenta un barrido lateral a lo largo de la fila central de focos en el área de señal. La eficiencia experimental y el error de uniformidad mostrado por este elemento fué de 51% y 20%, respectivamente. Al igual que con el diseño fuera de eje mostrado en el Capítulo 5, la imagen de reconstrucción resultante presenta una pseudoimagen conjugada del conjunto de focos deseado como resultado de un error existente entre la fase que se codifica y la que realmente modula la LCD. Un estudio detallado acerca de la influencia de este error de fase se presenta en [62].

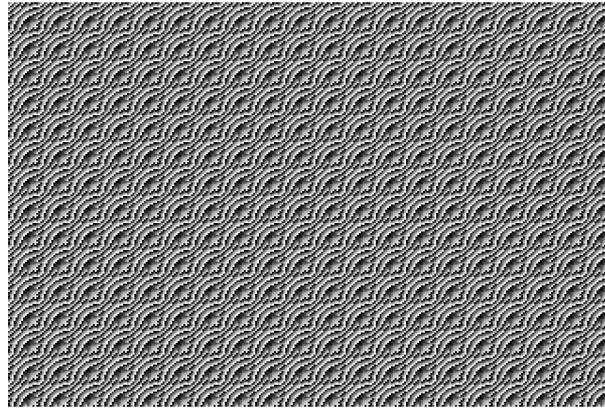
Por otro lado, la distribución de fase del EDP tipo Fourier fué codificada conjuntamente con la distribución de fase de una LP con $z = 45\text{cms}$, obteniéndose el elemento que se muestra en la Fig. 6.4(a). El campo de reconstrucción de este elemento se presenta en la Fig. 6.4(b). La Eficiencia de difracción del elemento y el error de uniformidad en el arreglo resultante fué de 52% y 19%, respectivamente. Un barrido lateral a lo largo de la fila central de los focos en el área de señal se presenta en la Fig. 6.4(c). Sorpresivamente, observamos que el campo de reconstrucción para este tipo de elementos no presenta una pseudoimagen conjugada como la que presenta el campo de reconstrucción para un EDP tipo Fourier implementado convencionalmente. Nótese además que tanto el EDP convencional como el EDP autoenfocable tienen un desempeño similar. Creemos que esto se debe principalmente a que para el caso convencional hemos manejado la señal a reconstruir fuera de eje y de este modo

podemos separar la señal deseada de la no deseada (la cual se presenta en forma conjugada). Para el caso del EDP autoenfocable tal información conjugada no contribuye directamente en el plano de reconstrucción, por lo tanto no puede visualizarse para el caso convencional.

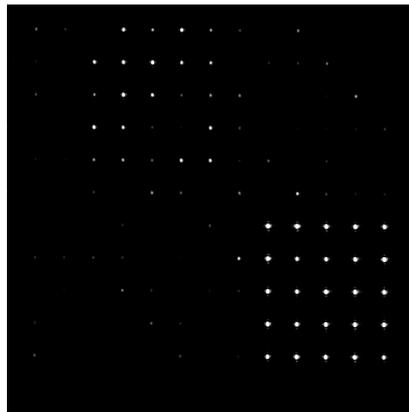
El siguiente ejemplo experimental corresponde a un EDP generador de un arreglo de 5×9 focos centrados en eje. En la Fig. 6.5 (a) se presenta la distribución de fase del EDP tipo Fourier, cuya celda básica esta formada de 32×24 pixeles. El patrón de difracción obtenido de forma convencional es presentado en la Fig. 6.5(b) y un barrido lateral a lo largo de la segunda fila focos en el área de señal se presenta en la Fig. 6.5(c). La Eficiencia de difracción experimental y el error de uniformidad que presentó este EDP fué de 38% y 52%, respectivamente. La distribución de fase de este EDP fué también empleada para formar un EDP autoenfocable, multiplicándolo su función de fase por la función de fase de una LP con $z = 40\text{cms}$. La distribución de fase resultante del EDP autoenfocable, que se muestra en la Fig. 6.6(a), fué codificada en la LCD. El patrón de difracción resultante para este elemento se muestra en la Fig. 6.6(b) obteniéndose una eficiencia de difracción experimental de 53.5% y un error de uniformidad de 23%. Un barrido lateral a lo largo de la segunda fila de focos en el área de señal se presenta en la Fig. 6.6(c). Como puede apreciarse una vez más, el patrón de difracción obtenido con el EDP autoenfocable presenta una mejor reconstrucción comparada con aquel obtenido con el EDP tipo Fourier convencional.

Como ejemplo final en la Fig. 6.7(a) se presenta la distribución de fase resultante de un holograma autoenfocable. El plano de reconstrucción para este EDP se encuentra a 50 cms y corresponde a la reconstrucción de una imagen del logo del INAOE (ver patrón de difracción en intensidad en la Fig. 6.7(b)).

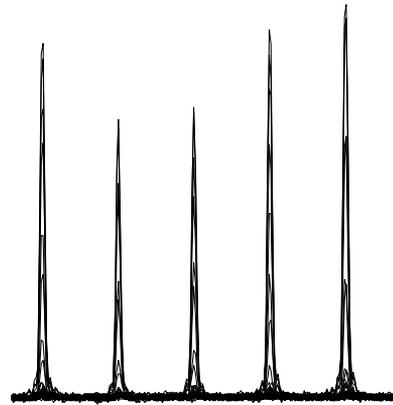
La eficiencia de difracción que presentó este holograma fué del 53%.



a)

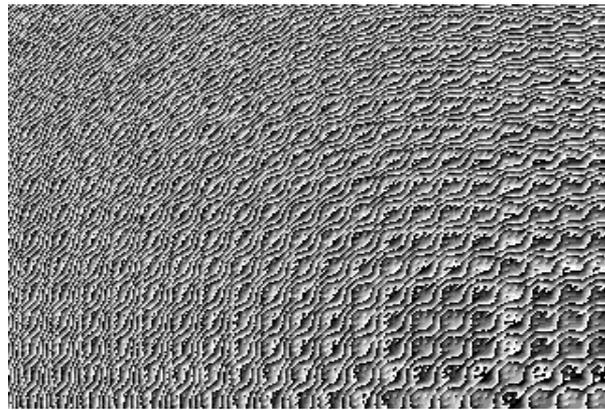


b)

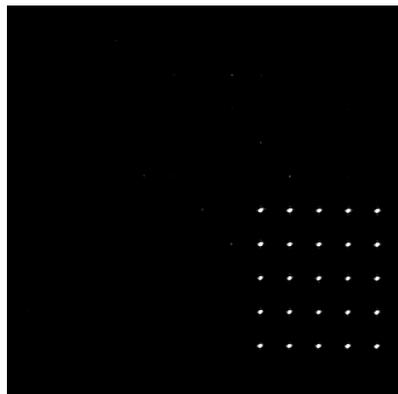


c)

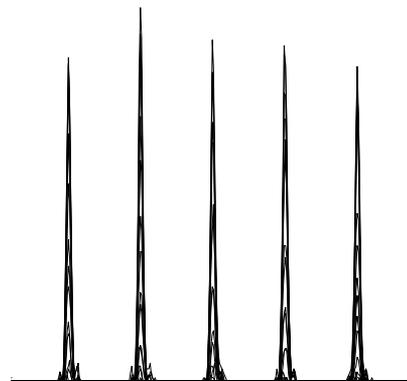
Figura 6.3: EDP tipo Fourier generador de un arreglo de 5×5 focos: a) Distribución de fase representada en escala de grises, b) patrón de difracción experimental y c) barrido lateral a lo largo de la fila central de focos en el área de señal.



a)

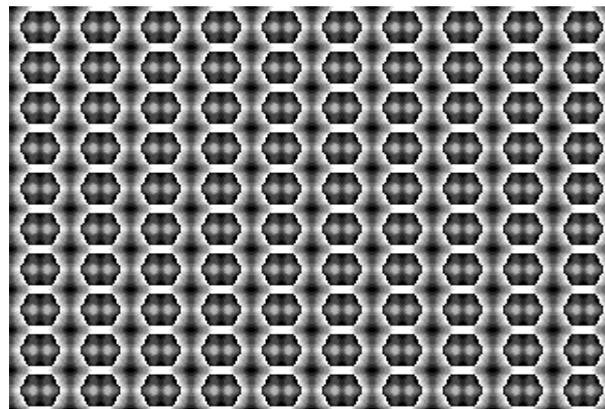


b)

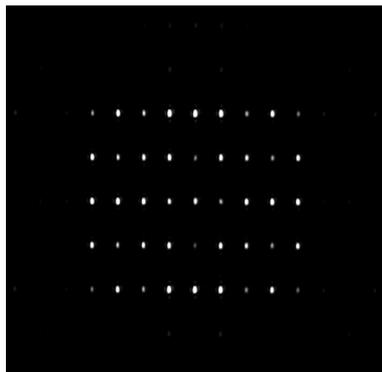


c)

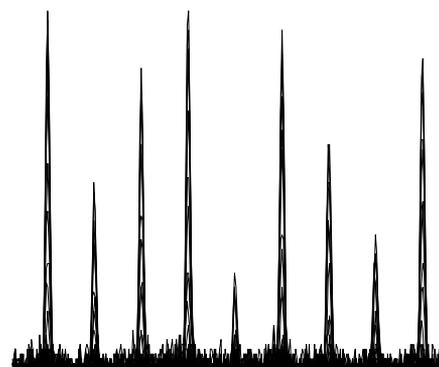
Figura 6.4: EDP autoenfocable generador de arreglo de 5×5 focos: a) Distribución de fase representada en escala de grises, b) patrón de difracción experimental en $z = 45\text{cms}$ y c) barrido lateral a lo largo de la fila central de focos en el área de señal.



a)

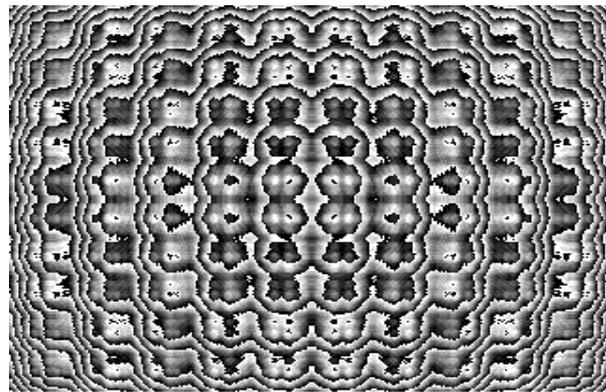


b)

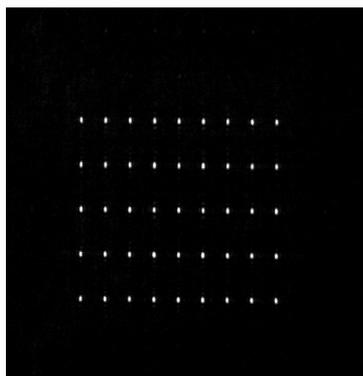


c)

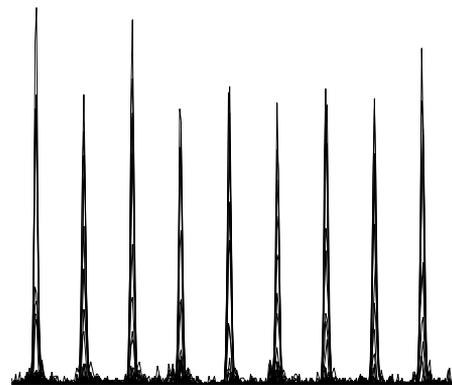
Figura 6.5: EDP tipo Fourier generador de un arreglo de 5×9 focos: a) Distribución de fase representada en escala de grises, b) patrón de difracción experimental y c) barrido lateral a lo largo de la segunda fila de focos en el área de señal.



a)



b)



c)

Figura 6.6: EDP autoenfocable generador de arreglo de 5×9 focos: a) Distribución de fase representada en escala de grises, b) patrón de difracción experimental en $z = 40\text{cms}$ y c) barrido lateral a lo largo de la segunda fila de focos en el área de señal.

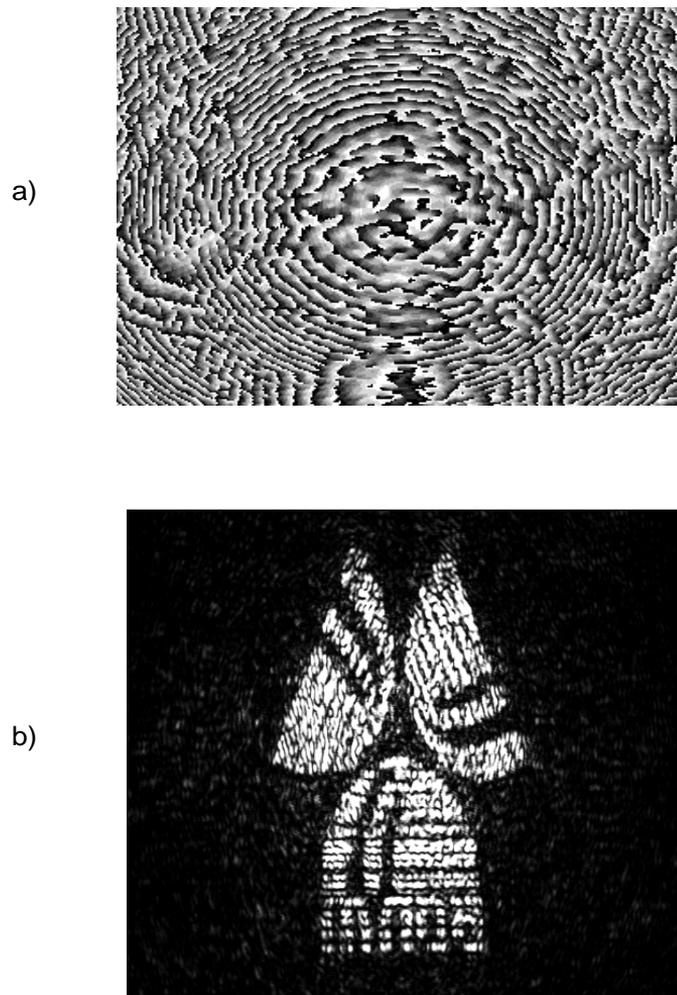


Figura 6.7: Holograma autoenfocable que reconstruye una imagen del logo INAOE: (a) Distribución de fase representada en escala de grises y (b) Campo de reconstrucción en intensidad.

6.4 Conclusiones.

Se propuso la realización de EDPs reconfigurables con propiedades de autoenfocamiento. Este tipo de elementos fué codificado en una LCD multiplicando la distribución de fase de una LP con la de un EDP tipo Fourier. El campo de reconstrucción de este tipo de elementos puede ser obtenido prescindiendo del uso de una lente refractiva. Además, mediante algunos ejemplos experimentales se comparó el desempeño de los EDPs autoenfocables con el que presentan los EDPs implementados con sistemas ópticos que incluyen una lente transformadora refractiva. Para los ejemplos aquí presentados hemos encontrado que los EDPs autoenfocables codificados en una LCD presentan una mejor reconstrucción aun cuando existan errores de fase por parte del modulador, ya que la información de fase conjugada generada por tales errores no tiene contribuciones directas sobre el plano de reconstrucción.

Capítulo 7

Conclusiones generales.

A pesar de que los EDPs implementados en una LCD no presenten una alta eficiencia de difracción, es conveniente recalcar la ventaja que representa la reconfigurabilidad en tiempo real de estos elementos comparado con aquellos que son creados con técnicas convencionales, donde se requiere la consideración de un tiempo de fabricación.

En este trabajo de tesis se presentó un proceso de caracterización de LCDs tipo TN en su modo de modulación mayormente en fase para la realización de EDPs reconfigurables. El proceso de caracterización consiste en los siguientes pasos: 1) Determinar la orientación del director molecular, 2) establecer una configuración polarizador/analizador para minimizar la transmitancia en amplitud y 3) medir la modulación de fase que puede manejar una LCD. Particularmente hemos presentado la caracterización, de las LCDs Kopin modelo 640 y 320 (empleando luz con una longitud de onda de $632.8nm$), para las cuales se obtuvo una máxima modulación de fase de 1.865π y 1.7485π , respectivamente. Además se propuso e implementó un novedoso método automatizado

para determinar valores de fase igualmente espaciados en una LCD, el cual, se basa en la optimización electro-óptica de rejillas tipo Blaze.

Considerando la estructura pixelizada de una LCD se presentó una formulación para describir el campo focal de las lentes pixelizadas y sus características, entre las cuales podemos mencionar el efecto de autoapodizado de una LP, el cual, tiene su origen en el tamaño finito del pixel. Además se llevo a cabo la implementación de LPs reconfigurables empleando LCDs. En este sentido se propuso la realización de dos dispositivos focalizadores direccionables. El primero de ellos fué una lente pixelizada que puede realizar un redireccionamiento de su foco en el espacio. El otro dispositivo es un arreglo de lentes pixelizadas, las cuales pueden direccionar su foco de forma independiente.

Por otro lado, también se presentó el diseño directo de EDPs tipo Fourier empleando el algoritmo SA. Mediante una modificación a este algoritmo, hemos demostrado como el diseño directo de EDPs presenta ventajas cuando su función de modulación de fase es restringida por una simetría similar a la del patrón de difracción deseado. La imposición de esta restricción a cada diseño ha permitido su optimización empleando un esfuerzo computacional relativamente menor. Algunos EDPs tipo Fourier fueron diseñados para su codificación en una LCD. Sin embargo, la reconstrucción experimental del patrón de difracción presentada por tales diseños no fué la deseada. Para realizar un mejor diseño es deseable que nuestro método considere los defectos del modulador empleado (en este caso las LCDs). Para solucionar este problema se desarrolló un método que emplea un sistema electro-óptico con retroalimentación construido alrededor de un EDP reconfigurable (la LCD) que es capaz de compensar las deficiencias que se presentan tanto por parte del modulador, así como las del sistema óptico. En consecuencia, los diseños resultantes con el procedimiento electro-óptico,

comparados con los obtenidos con una computadora, presentaron un campo de reconstrucción experimental mucho más cercano al deseado.

Como una de las últimas contribuciones de esta tesis se propuso y se presentó la realización de EDPs reconfigurables con propiedades de autoenfocamiento. Estos elementos fueron creados multiplicando la función de fase de una LP con la función de fase de un EDP tipo Fourier. De modo que, el campo de reconstrucción de estos elementos puede ser obtenido prescindiendo del uso de una lente refractiva. Adicionalmente, hemos mostrado experimentalmente que los errores de fase en una LCD no afectan directamente al patrón de reconstrucción para estos elementos, debido a que la señal conjugada que se genera (como se aprecia para los EDPs tipo Fourier implementados convencionalmente) no tiene contribuciones directas sobre el plano de reconstrucción.

Adicionalmente, en el Apéndice E se presentan las publicaciones y contribuciones derivadas de este trabajo de tesis.

7.1 Trabajo a futuro.

- Explorar novedosas aplicaciones de las LPs reconfigurables en áreas tales como perfilometría de superficies reflectivas.
- Estudiar las posibilidades que ofrece el empleo de LCDs en la modelación de haces (“beam shaping”).
- Explorar nuevas aplicaciones en el empleo de LCDs para el procesamiento de información óptica (p. ej. reconocimiento de patrones y filtraje espacial).

Apéndice A

Cristales uniaxiales.

En los cristales uniaxiales la luz que se propaga en alguna dirección se encuentra con una estructura molecular asimétrica. Tales sustancias presentan un efecto de birrefringencia; es decir, un rayo incidente en tal medio, dependiendo de la dirección de polarización, puede tomar dos direcciones diferentes. Una fuente puntual de luz natural sumergida dentro de este medio da lugar al surgimiento de ondas *o* esféricas y ondas *e* elipsoidales. La orientación del campo con respecto al eje óptico determina las velocidades con las que estas ondas se expanden. El campo \mathbf{E} de la onda *o* es en todas partes normal al eje óptico y así se mueve con una velocidad v_{\perp} en todas direcciones. Similarmente la onda *e* tiene una velocidad v_{\perp} solamente en la dirección del eje óptico (ver Fig. A.1) a lo largo del cual siempre es tangente a la onda *o*. Normal a esta dirección, \mathbf{E} es paralela al eje óptico y esa porción de la onda se expande con una velocidad v_{\parallel} . Los materiales uniaxiales tienen dos índices principales de refracción, $n_o \equiv c/v_{\perp}$ y $n_e \equiv c/v_{\parallel}$.

La diferencia $\Delta n = (n_e - n_o)$ es una medida de la birrefringencia. En los cristales

uniaxiales negativos, como se ilustra en la Fig. A.1(a), $v_{\parallel} > v_{\perp}$. Por otro lado, para los cristales uniaxiales positivos $v_{\perp} = v_{\parallel}$ (ver Fig. A.1(b)).

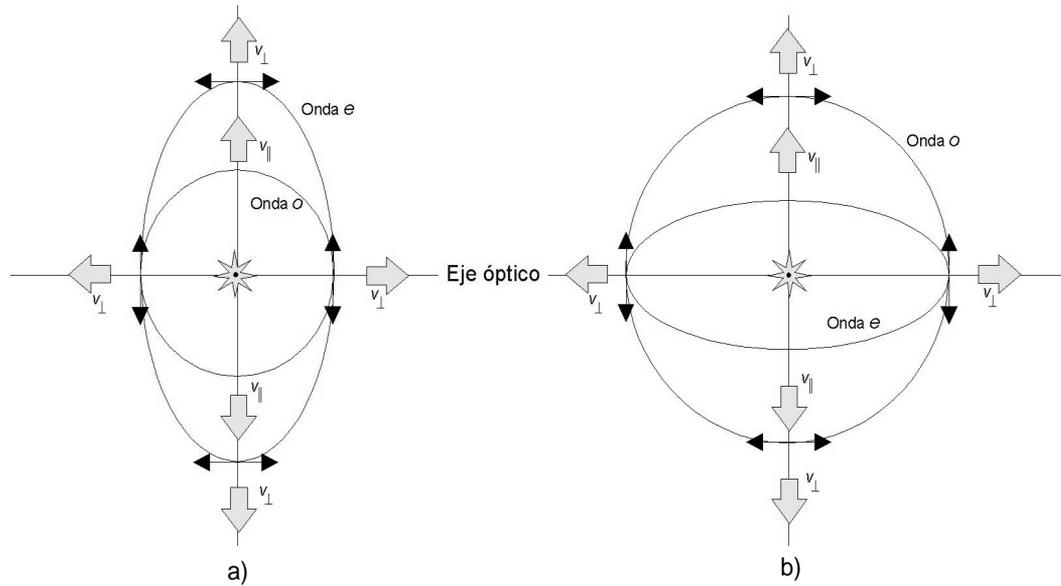


Figura A.1: Onda extraordinaria e y ordinaria o en un cristal uniaxial: a) negativo y b) positivo.

Apéndice B

LCDs:Tabla de especificaciones.

En este apartado se presentan las especificaciones de las LCDs empleadas para este trabajo de tesis, fabricadas por la corporación Kopin.

B.1 Modelo Cyberdisplay 320

Tipo de pantalla: Pantalla monocroma de cristal líquido tipo TN de matriz activa.

Modo de pantalla: Transmisiva.

Número de pixels: 76,800 (320 × 240).

Razón de contraste: 80:1.

Formato que soporta: entrada VGA de una PC.

Escala de grises: continua (sobre 256 niveles).

Tamaño de pixel: $\approx 12\mu m$.

Distancia entre pixeles: $\approx 15\mu m$.

B.2 Modelo Cyberdisplay 640

Tipo de pantalla: Pantalla monocroma de cristal líquido tipo TN de matriz activa.

Modo de pantalla: Transmisiva.

Número de pixels: 307,200 (640×480).

Razón de contraste: 100:1.

Formato que soporta: entrada VGA de una PC.

Escala de grises: continua (sobre 256 niveles).

Tamaño de pixel: $\approx 18\mu m$.

Distancia entre pixeles: $\approx 24\mu m$.

Apéndice C

Función de transmitancia de un EDP (caso generalizado).

Para expresar la transmitancia de un EDP (con $N \times N$ pixeles rectangulares y retardo de fase ϕ_{nm}) se consideran los siguientes casos:

Caso a) Se emplea un número impar de pixeles $N = 2Q + 1$ (ver Fig. C.1 a)).

Caso b) Se emplea un número par de pixeles $N = 2Q$ (ver Fig. C.1 b)).

La función de pupila del pixel en un EDP se expresa mediante la función rectangular

$$w(x, y) = \text{rect}(x/a)\text{rect}(y/a), \quad (\text{C.1})$$

donde a corresponde al tamaño del pixel.

En general, la transmitancia del EDP puede expresarse matemáticamente como:

$$t(x, y) = \sum_{n=n_1}^{n_2} \exp(i\phi_{nm})w(x - np + B(N)p/2, y - np + B(N)p/2), \quad (\text{C.2})$$

donde $B(N)$ es una función de paridad que es 0 para N impar (con $n_1 = -Q$ y $n_2 = Q$) y 1 para N par (con $n_1 = -Q + 1$ y $n_2 = Q$).

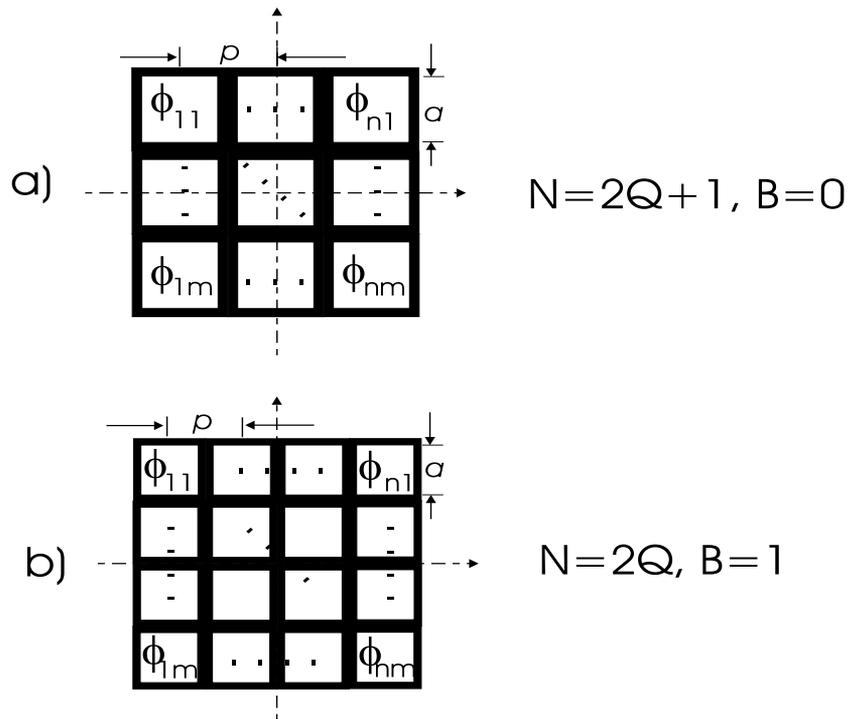


Figura C.1: EDP: a) considerando un número impar de píxeles, b) considerando un número par de píxeles.

Apéndice D

Algoritmo modificado Fienup.

El algoritmo Fienup es un método muy eficiente para el diseño de elementos difractivos de fase tipo Fourier [6]. En la Fig. C.1 se muestra un diagrama de flujo de una versión modificada del algoritmo Fienup empleado en el Capítulo 6 para el diseño de EDOs tipo Fourier. Los datos de entrada son el número de píxeles (M) a lo largo de cada eje del periodo básico del EDO, el conjunto de focos en el área de señal (Ω_S), y el error de uniformidad deseado (e_{goal}). También se introduce un contador c (inicializado con cero), una función de error $e(c)$ (inicializado con un valor $\gg 1$), y un parámetro de restricción a la señal K (con un valor inicial de 1), el cual es definido como $K \equiv \eta_{goal}/\eta_L$, donde η_{goal} es la eficiencia objetivo para la restricción de la señal y η_L es la eficiencia límite del EDO dada como:

$$\eta_L = Q \left[\sum_{(q,l) \in \Omega_S} E^{-2}(q,l) \right]^{-1}, \quad (\text{D.1})$$

donde Q es el número de focos deseados en el área de señal. La etapa inicial es completada calculando la distribución inicial ϕ_{nm} del EDO.

Una iteración del programa comienza al establecer la matriz de transmisión $[t]$ [con componentes $t_{nm} = \exp(i\phi_{nm})$]. Los valores de fase ϕ_{nm} son obtenidos de la etapa de inicialización o del resultado de una iteración previa. En el siguiente paso, la matriz $[W]$ [conteniendo los valores de $W(q, l)$] in el dominio Ω_W es calculada como la transformada discreta de Fourier (DFT por sus siglas en inglés) de $[t]$ (véase Ec.(4.7)). El error de uniformidad en la señal, $e(c)$, se calcula como la máxima desviación de las eficiencias locales en area de señal normalizada con su valor promedio. Esta evaluación del desempeño del EDO es seguida por dos etapas de decisión. La primera es establecida para interrumpir el programa si el error $e(c)$ no es mayor que e_{goal} , y la segunda para detectar y evitar un estancamiento en la reducción de error. Para nuestro programa en particular, si la diferencia de error, $e(c-1) - e(c)$, entre las iteraciones $c-1$ y c es menor que 10^4 , una reducción de 10^4 es impuesta a K . Este ajuste a lo largo del proceso de optimización permite la reducción arbitraria del error de uniformidad en el area de señal.

La siguiente etapa es la llamada restricción de la señal, que substituye la matriz $[W]$ con una nueva matriz $[W']$, dado como una función de $[W]$, $[W_I]$, y K . La nueva función de peso W' tiene asociada eficiencias locales, calculadas con la Ec.(4.11) empleando W' en lugar de W . Los requerimientos para estas eficiencias locales son un error de uniformidad cero (en Ω_S), y una eficiencia de reconstrucción $\eta'_S = \eta_{goal} = K\eta_L$. Como es usual en este algoritmo, la fase en el dominio de la señal permanece sin cambio; es decir, $arg(W') = arg(W)$. Debido a que la transferencia de energía a los focos de la señal es a expensas de los focos fuera de la señal, imponemos la condición $sum_{(q,l) \in \Omega_W} |W'| = 1$. Esta normalización es una propiedad de la función de peso original $W(q, l)$ (basado en el teorema de Parseval para rejillas periódicas de fase). Una definición de

$[W']$ [para $(q, l) \in \Omega_W$], que satisface las condiciones anteriores, es dado por

$$W'(q, l) = \begin{cases} \sqrt{K}|W_I(q, l) \exp[i \arg(W(q, l))] & \text{si } (q, l) \in \Omega_S \\ A(W(q, l)) & \text{si } (q, l) \notin \Omega_S \end{cases} \quad (\text{D.2})$$

donde $A = \sqrt{(1 - K)/(1 - \eta_2)}$, y $\eta_2 = \sum_{(q, l) \in \Omega_S} |W(q, l)|^2$.

Durante la optimización se busca el valor máximo de K que nos permita una reducción arbitraria del error de uniformidad en la reconstrucción. Para tal propósito, el proceso comienza con $K = 1$. Este valor es ligeramente reducido para iteraciones que muestran estancamiento en la reducción de error. En general, reducciones más pequeñas de K se asocian a valores más altos de la eficiencia de reconstrucción final para una uniformidad objetivo dada. El costo es un número de iteraciones más grande.

Después de que $[W']$ ha sido establecida, la matriz de transmitancia del nuevo DOE $[t']$ [con valores $t'_{nm} = |t'_{nm}| \exp(i\phi'_{nm})$] es calculada con la transformada discreta de Fourier inversa (DFT^{-1}) de $[W']$. Para completar la iteración, la distribución de fase del nuevo DOE es adoptada como $\phi_{nm} = \phi'_{nm}$.

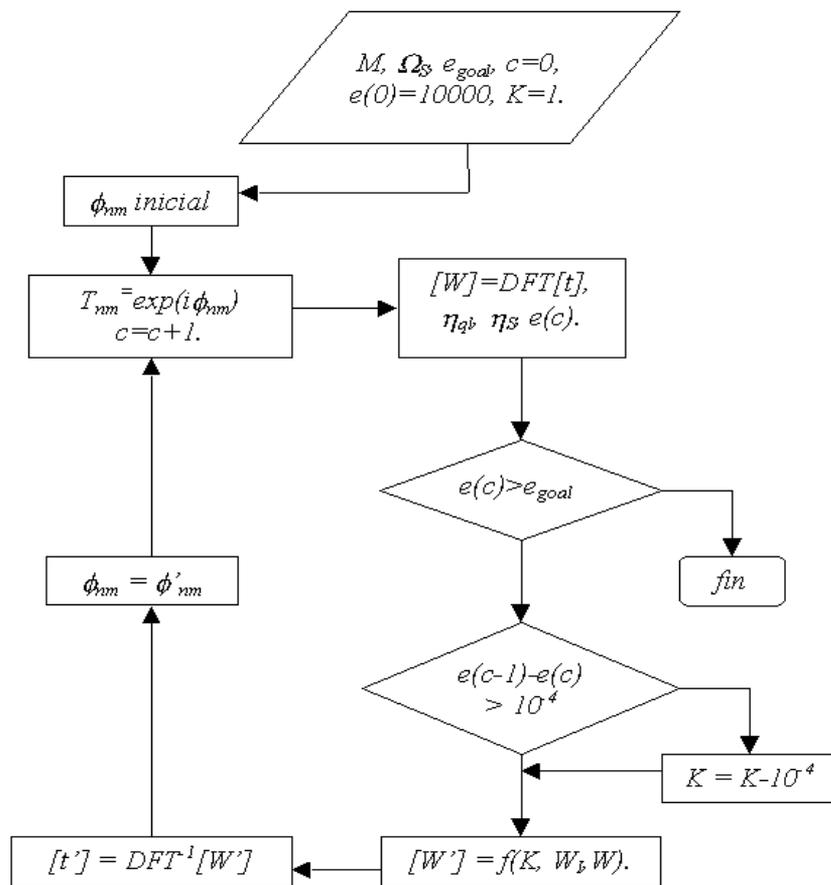


Figura D.1: Diagrama de flujo del algoritmo modificado Fienup para diseño de EDOs.

Apéndice E

Publicaciones: Artículos y trabajos presentados.

- Serrano-Heredia, J. G. Ibarra, L. A. González-López, G. Rojo-Velázquez, E. Carreón y V. Arrizón. “Pantallas de cristal líquido en computación óptica” Memorias del SOMI XII Congreso de instrumentación, pp. 589-593, (1997).
- L. A. González-López, J. A. Moguel, A. Serrano-Heredia, V. Arrizón. “Método óptico para medir la modulación en fase en pantallas de cristal líquido basado en las propiedades de las rejillas Blaze” Memorias del SOMI XIII Congreso de instrumentación, pp.472-476. (1998).
- J.J. Sánchez-Escobar, A. Serrano-Heredia, A. Medina-Mendoza, E. Carreón-González, L. A. González-López. “Sistema automático óptico-digital para el reconocimiento de patrones”. Congreso Nacional de Física, Octubre de 1998, San Luis Potosí, S. L. P.

-
- V. Arrizón, E. Carreón, and L. A. González, “ Self-apodization of low-resolution pixelated lenses”, *Appl. Opt.*, **38**, 5073-5077 (1999).
 - E. Tepichín, D. Sánchez, V. Arrizón, L. A. González. “Transformada fraccional de Hilbert dinámica” Congreso Nacional de Física, Noviembre de 1999, Villa Hermosa, Tab.
 - L. A. González, E. Tepichín, V. Arrizón, “Filtros de fase dinámica con un modulador espacial de luz electro-óptico,” *Memorias SOMI XV OPT-5*, (2000).
 - L. A. González, V. Arrizón. “Improved simulated annealing algorithm for optimization of symmetrical diffractive elements,” *SPIE*, **3951**, 118-125 (2000)
 - V. Arrizón. L. A. González “Optimization of quantized diffractive elements with symmetry constraints”. *Opt. Comm.*, **180**, 247-254 (2000)
 - D. Sánchez-de-la-Llave, V. Arrizón, A. Olivares, E. Tepichín, L. A. González, “Joint Transform Edge Enhancement”, enviado a la revista *Journal of Optics* (Rusia).
 - V. Arrizón, E. Carreón, G. Rojo-Velázquez, and L. A. González, “Design and optimization of pixelated Fresnel array illuminators”, enviado a la revista *Journal of Optics* (Rusia).
 - V. Arrizón, Luis A. González, “ Array illuminator based on a single low-resolution pixelated lens ”, enviado a la revista *Optics Comm.*

Lista de Figuras

2.1	Estructura de una celda de cristal líquido.	18
2.2	Orientación de las moléculas en un dispositivo de cristal líquido: (a) en equilibrio sin campo aplicado, (b) con un campo ligeramente mas grande que el campo crítico, (c) en equilibrio con un campo suficientemente fuerte.	19
2.3	Rotación de la dirección molecular en un cristal líquido tipo TN.	20
2.4	Control de la amplitud de un haz de luz con una celda de cristal líquido tipo TN.	21
2.5	Sistema experimental para encontrar los nulos en intensidad en una LCD tipo TN, los cuales indican las orientaciones de los ejes extraordinario y ordinario.	24
2.6	Representación gráfica de una rejilla binaria con transmitancia compleja.	26

2.7	Comportamiento del orden cero de difracción: a) para una rejilla de fase binaria dinámica (simulación numérica), b) para una rejilla binaria codificada en la LCD Kopin 640 con transmitancia de amplitud minimizada, iluminada tanto con luz linealmente polarizada a 69 grados (curva continua), así como con luz linealmente polarizada a 159 grados (curva segmentada).	28
2.8	Transmitancia en amplitud para la LCD Kopin 640 y Kopin 320.	29
2.9	Representación gráfica de una rejilla multinivel con transmitancia compleja.	31
2.10	Sistema electro-óptico automatizado para la caracterización de valores de fase igualmente espaciados en una LCD.	33
2.11	Diagrama de flujo del proceso de optimización electro-óptica para la obtención de valores de fase igualmente espaciados en una LCD.	36
2.12	Valores de fase igualmente espaciados en la LCD Kopin 640 (16 niveles) y Kopin 320 (8 niveles) como resultado del proceso de optimización electro-óptica de rejillas tipo Blaze empleando $\lambda = 632.8 \text{ nm}$	37
2.13	Distribución de intensidades en los órdenes de difracción para una rejilla tipo Blaze de 8 niveles de fase codificada en la LCD Kopin 320: a) imagen obtenida con la CCD y b) barrido a través de cada orden	39
2.14	Transformada fraccional de Hilbert realizada con un filtro de fase dinámica codificado en la LCD Kopin 640: (a) Imagen del objeto ($P = 0$), (b) $P = 0.5$, (c) $P = 1$, y (d) $P = 1.5$	40

3.1	Estructura de un EDP.	45
3.2	Intensidad axial en el foco principal de una LP.	49
3.3	Intensidad del foco principal de una LP (curva continua) y la del foco de una lente continua (curva segmentada).	50
3.4	Grado de apodización de una LP como función de la razón $r =$ $a/\lambda f_N$ (curva continua) y el correspondiente ensanchamiento En de su foco principal (curva segmentada.)	52
3.5	Lente pixelizada: a) sin restricciones de fase, c) cuantizada a 16 niveles de fase y c) su foco principal calculado numéricamente. .	54
3.6	Sistema electro-óptico para la implementación experimental de LPs.	55
3.7	Foco experimental de la LP implementada con la LCD Kopin 640.	56
3.8	Lente pixelizada con foco desplazado lateralmente: a) sin re- stricciones de fase, b) cuantizada a 8 niveles de fase y c) su foco principal calculado numéricamente.	57
3.9	Lente con foco direccionable empleando una LCD: (izquierda) imagen en escala de grises que representa la distribución de fase, (derecha) Campo focal resultante.	59
3.10	Arreglo de 5×5 LPs codificada en una LCD: a) distribución de fase cuantizada a 8 niveles con focos igualmente espaciados b) distribución de fase cuantizada a 8 niveles con focos en posiciones arbitrarias.	60

4.1	Estructura de un EDP periódico de fase, cuya celda básica se forma de $M \times M$ pixeles.	65
4.2	EDP unidimensional generador de arreglos de iluminación tipo Fourier diseñado con el algoritmo SA convencional: (a) celda básica de la distribución de fase del EDP optimizado, y (b) distribución de fase simétrica obtenida con un corrimiento cíclico de 4 pixeles en la celda básica optimizada.	70
4.3	Arreglo simétrico de $N \times N$ órdenes de difracción, centrados en el orden de difracción (0,0). Las líneas punteadas representan los ejes de simetría.	71
4.4	Celda básica de un EDP con 8×8 pixeles: (a) conjunto típico de 8 pixeles simétricos (marcados con '×') y 4 pixeles simétricos sobre los ejes vertical y horizontal (marcados con 'O'). (b) Pixeles en el octante principal de la celda básica (marcados con '×').	72
4.5	Diagrama de flujo correspondiente al algoritmo SA para optimizar EDPs con restricciones por simetría espacial.	74
4.6	(a) Imagen a escala de grises de la distribución de fase para la celda básica del generador de un arreglo tipo Fourier de 9×9 focos, optimizado con el algoritmo SA convencional, y (b) eficiencias locales de difracción en el dominio de la señal representadas por barras.	76
4.7	Resultados similares a los mostrados en la Fig. 4.6, empleando el algoritmo SA modificado.	77

4.8	Función de costo contra número de iteraciones durante la optimización del generador de un arreglo de 11×11 focos, empleando (respectivamente) el procedimiento convencional y el modificado.	78
4.9	(a) Imagen a escala de grises de la distribución de fase para la celda básica del generador de un arreglo tipo Fourier de 11×11 focos, optimizado con el algoritmo SA convencional, y (b) eficiencias locales de difracción en el dominio de la señal representadas por barras.	79
4.10	Resultados similares a los mostrados en la Fig. 4.9, empleando el algoritmo SA modificado.	80
5.1	Estructura periódica de un EDP generador de arreglos de iluminación empleando una LCD.	84
5.2	Diagrama esquemático del sistema de optimización electro-óptica.	86
5.3	Sistema electro-óptico experimental con su lazo de retroalimentación.	89
5.4	Diseño digital de un EDP generador de 5×5 focos centrados en $(0,0)$: (a) Imagen a escala de grises de la distribución de fase en la celda básica, (b) Imagen experimental en el plano de difracción, y (c) perfil de intensidades a lo largo de la fila central del conjunto de focos en el área de señal.	90

5.5	Diseño digital de un EDP generador de 5×5 focos centrados en (3,3): (a) Imagen a escala de grises de la distribución de fase en la celda básica, (b) Imagen experimental en el plano de difracción, y (c) perfil de intensidades a lo largo de la fila central del conjunto de focos en el área de señal.	91
5.6	Resultados similares a los presentados en la Fig. 5.4, usando el procedimiento de diseño electro-óptico.	93
5.7	Resultados similares a los presentados en la Fig. 5.5, usando el procedimiento de diseño electro-óptico.	94
5.8	Diseño electro-óptico de un EDP generador de 9×9 focos centrados en (0,0): (a) Imagen a escala de grises de la distribución de fase en la celda básica, (b) Imagen experimental en el plano de difracción, y (c) barrido lateral a lo largo de la fila central del arreglo de focos en el área de señal.	95
6.1	Foco principal de una lente pixelizada (curva sólida) y foco de una lente continua (curva segmentada): (a) en $z = 4.5\text{cms}$, y (b) en $z = 40\text{cms}$	101
6.2	EDP autoenfocable generador de un arreglo de 1×9 focos: a) distribución de fase de una LP, b) EDP tipo Fourier, c) EDP resultante cuantizado a 8 niveles de fase y d) campo de reconstrucción.	102

6.3	EDP tipo Fourier generador de un arreglo de 5×5 focos: a) Distribución de fase representada en escala de grises, b) patrón de difracción experimental y c) barrido lateral a lo largo de la fila central de focos en el área de señal.	106
6.4	EDP autoenfocable generador de arreglo de 5×5 focos: a) Distribución de fase representada en escala de grises, b) patrón de difracción experimental en $z = 45\text{cms}$ y c) barrido lateral a lo largo de la fila central de focos en el área de señal.	107
6.5	EDP tipo Fourier generador de un arreglo de 5×9 focos: a) Distribución de fase representada en escala de grises, b) patrón de difracción experimental y c) barrido lateral a lo largo de la segunda fila de focos en el área de señal.	108
6.6	EDP autoenfocable generador de arreglo de 5×9 focos: a) Distribución de fase representada en escala de grises, b) patrón de difracción experimental en $z = 40\text{cms}$ y c) barrido lateral a lo largo de la segunda fila de focos en el área de señal.	109
6.7	Holograma autoenfocable que reconstruye una imagen del logo INAOE: (a) Distribución de fase representada en escala de grises y (b) Campo de reconstrucción en intensidad.	110
A.1	Onda extraordinaria e y ordinaria o en un cristal uniaxial: a) negativo y b) positivo.	116
C.1	EDP: a) considerando un número impar de pixeles, b) considerando un número par de pixeles.	120

D.1 Diagrama de flujo del algoritmo modificado Fienup para diseño
de EDOs. 124

Lista de Tablas

4.1	Evaluación de varios generadores de arreglos de focos diseñados con los algoritmos SA convencional y SA modificado. Los diseños emplean celdas básicas con 64×64 pixeles y 8 niveles de cuantización de fase.	75
-----	--	----

Bibliografía

- [1] J. W. Goodman, Introduction to Fourier Optics, McGraw-Hill, New York, 1968.
- [2] J. Jahns, and S. H. Lee, Optical computing Hardware, California: Academic Press, Inc., 1994.
- [3] B. R. Brown, and A. W. Lohmann, “Complex spatial filtering with binary masks”, *Appl. Opt.*, **5** 967-969 (1966).
- [4] S. Sinzinger, and J. Jahns, Microoptics, Wiley-VCH, Weinheim, 1999.
- [5] N. C. Gallagher, and B. Liu, “Method for computing kinoforms that reduces image reconstruction error,” *Appl. Opt.*, **12** 2328-2335 (1973).
- [6] J. R. Fienup, “Iterative method applied to image reconstruction and to computer-generated holograms”, *Opt. Eng.*, **19**, 297-305 (1980).
- [7] B. K. Jennison, J. P. Allebach, and D. W. Sweeney, “Iterative approaches to computer-generated holography”, *Opt. Eng.*, **28**, 629-637 (1989).
- [8] J. Turunen, A. Vasara, and J. Westerholm, “Kinoform phase relief synthesis: a stochastic method”, *Opt. Eng.*, **28**, 1162-1167 (1989).
- [9] M. R. Feldman, and C. C. Guest, “High-efficiency hologram encoding for generation of spot arrays”, *Opt. Lett.*, **14**, 479-481 (1989).

-
- [10] D. E. G. Johnson, A. D. Kathman, D. H. Hochmuth, A. L. Cook, D.R. Brown, and B. Delaney, “Advantages of genetic algorithm optimization methods in diffractive optic design”, SPIE. Critical Reviews, **CR49**, 54-74 (1993).
- [11] J. N. Mait, “Understanding diffractive optic design in the scalar domain”, J. Opt. Soc. A. A, **12**, 2145-2158 (1995).
- [12] E. Carcolé, J. Campos, and S. Bunch, “Diffraction theory of Fresnel lenses encoded in low-resolution devices”, Appl. Opt. **33**, 162-174 (1994).
- [13] J. A. Davis, D. M. Cottrell, R. A. Lilly, and S. W. Connely, “Multiplexed phase-encoded lenses written on spatial light” Opt. Lett. **14**, 420-422 (1989).
- [14] V. Laude, “Twisted-nematic liquid-crystal pixelated active lens ”, Opt. Commun., **153**, 134-152 (1998).
- [15] J. Tsai, S. H. Lin, T. C. Hsieh, and K. Hsu, “The spatially-distributed recording of the composite filter using the pixelated liquid crystal display”, Opt. Commun., **163**, 169-174 (1999).
- [16] J. A. Davis, W. V. Brandt, D. M. Cottrell, and R. M. Bunch, “Spatial image differentiation using programmable binary optical elements”, Appl. Opt. **30**, 4610-4614 (1991).
- [17] J. A. Davis, A. M. Field, J. J. Heiskala, and D. M. Cottrell, “Phase analysis of diffracted beams using multiplexed Fourier transform lenses”, Opt. Eng., **34**, 50-55 (1995).
-

-
- [18] V. Arrizón, E. Carreón, and M. Testorf, "Implementation of Fourier array illuminators using pixelated SLM: efficiency limit" *Opt. Commun.*, **160** 207-213 (1999).
- [19] D. M. Cottrell, J. A. Davis, T. R. Hedman, and R. A. Lilly, "Multiple imaging phase-encoded optical elements written as programmable spatial light modulators", *Appl. Opt.* **29**, 2505-2509 (1990).
- [20] J. N. Mait, and K. H. Brenner, "Optical symbolic substitution-System design using phase-only holograms", *Appl. Opt.*, **27**, 1692-1700 (1988).
- [21] E. Carreón, and V. Arrizón, "Analysis and design of pixelated diffractive elements in the Fresnel domain", *Diffractive/Holographic Technologies and Spatial Light Modulators VII*, Proc. SPIE **3951** 241 (2000).
- [22] V. Arrizón, E. Carreón, and L. A. González, " Self-apodization of low-resolution pixelated lenses", *Appl. Opt.*, **38**, 5073-5077 (1999).
- [23] T. D. Hudson, J. C. Kirsch, and D. A. Gregory, " Comparison of optically addressed spatial light modulators", *Proc. SPIE*, **1474**, 101-111 (1991).
- [24] D. A. Gregory, R. D. Juday, J. Sampsell, R. Gale, R. W. Cohn, and S.E. Monroe, Jr, " Optical characteristics of a deformable-mirror spatial light modulator", *Opt. Lett.*, **13**, 10-12 (1988).
- [25] J. C. Kirsch, and D. A. Gregory, " Video rate optical correlation using a magneto-optic spatial light modulator", *Opt. Eng.*, **29**, 1122-1128 (1990).
- [26] T. Y. Hsu, U. Efron, W. Y. Wu, J. N. Schulman, I. J. D'Haenens, and Y. Chang, " Multiple quantum well spatial light modulators for optical processing applications", *Opt. Eng.*, **27**, 372-377 (1988).
-

-
- [27] M. Young, “Low-cost LCD video display for optical processing”, *Appl. Opt.*, **25**, 1024-1026 (1986).
- [28] T. H. Barnes, T. Eiju, K. Matsuda, H. Ichikawa. M. R. Taghizadeh, and J. Turunen “Reconfigurable free-space optical interconnections with a phase-only liquid-crystal spatial light modulator”, *Appl. Opt.*, **31**, 5527-5535 (1992).
- [29] D. A. Gregory, “ Real-time optical pattern recognition using a modified liquid-crystal television spatial light modulator”, *Appl. Opt.*, **25**, 467-469 (1986).
- [30] F. Mok, J. Diep, H. K. Liu, and D. Psaltis, “Real-time computer-generated hologram by means of liquid-crystal television spatial light modulator,” *Opt. lett.* **11**, 748-750 (1986).
- [31] F. T. S. Yu, S. Jutamulia, *Optical Signal Processing, Computing and Neural Networks*, Wiley-Interscience, (1992).
- [32] B. E. A. and Saleh, M. C. Teich, *Fundamentals of Photonics*, John Wiley & sons, Inc., (1991) .
- [33] N. Konforti, E. Marom and S. T. Wu, “Phase-only modulation with a twisted nematic liquid crystal television,” *Opt. Lett.*, **13**, 251-253 (1988).
- [34] J. C. Kirsch, D. A. Gregory, M. W. Thie and B. K. Jones, “Modulation characteristics of the Epson liquid crystal television,” *Opt. Eng.*, **31**, 963-970 (1992).
- [35] L. G. Neto, D. Roberge and Y. Sheng, “Programmable optical phase-mostly holograms with couple-mode modulation liquid crystal television,” *Appl. Opt.*, **34**, 1944-1950 (1995).
-

-
- [36] R. Dou, and M. K. Giles, "Simple technique for measuring the phase property of a twisted nematic liquid crystal television," *Opt. Eng.*, **35**, 808-812 (1996).
- [37] A. Bergeron, J. Gauvin, F. Gagnon, D. Gingras, H. Arsenault, and M. Doucet, "Phase calibration and applications of a liquid crystal television spatial light modulator," *Appl. Opt.*, **34**, 5133-5139 (1995).
- [38] Z. Zhang, G. Lu and F. T. S. Yu, "Simple method for measuring phase modulation in liquid crystal televisions," *Opt. Eng.*, **33**, 3018-3022 (1994).
- [39] J. L. McClain, P. S. Erbach, D. A. Gregory, and F. T. S. Yu, "Spatial light modulator phase depth determination from optical diffraction information," *Opt. Eng.*, **35**, 951-954 (1996).
- [40] S. E. Gilman, T. G. Baur, and D. J. Gallagher, "Properties of tunable nematic crystal retarders," *Proc. SPIE.*, **1166**, 461-471 (1989).
- [41] G. Baur, F. Windscheid, and D. W. Berreman, "Optical properties of a nematic twist cell," *Appl. Phys.* **8**, 101-106 (1975).
- [42] W. E. Ross, D. Psaltis, and R. H. Anderson, "Two-dimensional magneto-optic spatial light modulators for signal processing," *Proc. SPIE.*, **341**, 191-198 (1982).
- [43] D. Casasent and S. F. Xia, "Phase corrections of light modulators," *Opt. Lett.* **11**, 398-400 (1986).
- [44] A. M. Tai, "Low-cost LCD spatial light modulator with high optical quality," *Appl. Opt.* **25**, 1380-1382 (1986).
-

-
- [45] D. M. Budgett, J. H. Sharp, P. C. Tang, R. C. D. Young, B. F. Scott, and C. R. Chadwin, "Electronic compensation for nonideal spatial light modulator characteristics," *Opt. Eng.* **39**, 2601-2608 (1986).
- [46] D. W. Berreman, "Dynamics of liquid-crystal twist cells," *Appl. Phys. Lett.* **25**, 12-15 (1974).
- [47] H. M. Kim, J. W. Jeong, M.H. Kang, and S. I. Jeong, "Phase correction of a spatial light modulator displaying a binary only filter," *Appl. Opt.*, **27**, 4167-4168 (1988).
- [48] L. A. González, E. Tepichín, V. Arrizón, "Filtros de fase dinámica con un modulador espacial de luz electro-óptico," *Memorias SOMI XV OPT-5*, (2000).
- [49] A. W. Lohmann, D. Mendlovic, and Z. Zalevsky, "Fractional Hilbert transform," *Opt. Lett.* **21**, 281-283, (1996).
- [50] A. W. Lohmann, E. Tepichín, and J. G. Ramírez, "Optical implementation of the fractional Hilbert transform for two-dimensional objects," *Appl. Opt.* **36**, 6620-6626, (1997).
- [51] J. A. Davis, D. E. McNamara, D. M. Cottrell, "Analysis of fractional Hilbert transform," *Appl. Opt.* **37**, 6911-6916, (1999).
- [52] V. V. Wong, and G. J. Swanson, "Design and fabrication of a Gaussian fan-out optical interconnect," *Appl. Opt.*, **32**, 2502-2511 (1993).
- [53] W. B. Veldkamp, J. R. Leger, and G. J. Swanson, "Coherent summation of laser beams using binary phase gratings," *Opt. Lett.*, **11**, 303-305 (1986).
-

-
- [54] H. Dammann, and K. Görtler, "High-efficiency in-line multiple imaging by means of multiple phase holograms", *Opt. Commun.* **3**, 312-315 (1971).
- [55] L. A. González, V. Arrizón. "Improved simulated annealing algorithm for optimization of symmetrical diffractive elements," *SPIE*, **3951**, 118-125 (2000)
- [56] V. Arrizón. L. A. González "Optimization of quantized diffractive elements with symmetry constraints". *Opt. Comm.*, **180**, 247-254 (2000)
- [57] N. Yoshikawa, T. Yatagai, "Phase optimization of a kinoform by simulated annealing", *Appl. Opt.*, **33**, 863-868 (1994).
- [58] S. Kirkpatrick, C. D. Gelatt, Jr., and M. P. Vecchi, "Optimization by simulated annealing", *SCIENCE*, **180**, 671-680 (1983).
- [59] Y. Takaki, and H. Ohzu, "Reconfigurable lens with an electro-optical learning system," *Appl. Opt.*, **35**, 6896-6908 (1996).
- [60] B. Löfving, "Self-adjusting dynamic binary phase holograms," *Appl. Opt.*, **36**, 2347-2352 (1997).
- [61] V. Arrizón, M. Testorf, S. Sinzinger, and J. Jhans, "Iterative optimization of phase-only diffractive optical elements based on lenslet array," *J. Opt. Soc. Am.*, **22**, 197-199 (2001).
- [62] A. Tatone, Z. Zhang, C. M. Uang, F. T. S. Yu, and D. A. Gregory, "Phase modulation depth for a real-time kinoform using a liquid crystal television", *Opt. Eng.*, **33**, 3018-3022 (1994).
-

-
- [63] D. Mendlovic, and I. Kiryuschev, “Two-channel computer-generated hologram and its application for optical correlation,” *Opt. Comm*, **116**, 322-325 (1995).
- [64] R. ChaoHong, Z. Jin, and G. WenQi, “Four-channel self-focus computer-generated hologram,” *Appl. Opt.*, **36**, 8844-8847 (1997).
- [65] V. Arrizón, and L. A. González “ Only-phase diffractive elements with self-focusing properties implemented in a liquid crystal spatial light modulator”, enviado a *Opt. Eng.*