

# DECODIFICACIÓN BASADA EN LA DIFRACCIÓN POR EL BORDE DE UNA PELÍCULA NANOMÉTRICA PARA HACES CON MOMENTO ANGULAR ORBITAL

<sup>1,2</sup>Jesús-H. Mendoza-Castro, <sup>2</sup>Jaime-G. Barrero-Pérez y <sup>1</sup>Yezid Torres-Moreno

<sup>1</sup>GOTS, Grupo de Óptica y Tratamiento de Señales, Escuela de Física, Universidad Industrial de Santander, A.A.678, Bucaramanga, Colombia. <sup>2</sup>E3T, Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad Industrial de Santander, A.A.678, Bucaramanga, Colombia.

## R esumen

El Momento Angular Orbital (MAO), está relacionado con la distribución espacial del frente de onda. Estos frentes de onda se producen frecuentemente usando hologramas tenedor mediante un modulador espacial de luz. Esta propiedad de la onda permite codificar información que al transmitirse le confiere inmunidad a la interferencia electromagnética y permite un aumento considerable en el ancho de banda, la cadencia y la capacidad, al canal de comunicación. Este trabajo estudia, mediante simulación numérica e implementación experimental, un sistema optoelectrónico de decodificación basado en el patrón de difracción de Fraunhofer del haz Bessel-Gauss con carga topológica entera por un borde de espesor nanométrico, visto a través de una abertura triangular equilátera. Se reporta una nueva regla sencilla para determinar la carga topológica, signo y valor, basada en el perfil de intensidad del haz MAO difractado.

**Palabras claves:** decodificación, MAO, optoelectrónica, película nanométrica, holograma de tenedor

## A bstract

The Orbital Angular Momentum (OAM) relates the spatial distribution of the light beam wavefront. These wavefronts are produced frequently through a Fork-type hologram recorded in a spatial light modulator. This wave property allows to code information when is transmitted in a communication channel, giving immunity to electromagnetic interference; increasing significantly their bandwidth, cadence and capacity. This paper studies, by numerical simulation and experimental implementation, a decoding optoelectronic device based in the Fraunhofer diffraction pattern of integer OAM Bessel-Gauss beams, diffracted by a nanometric thickness straight edge and seen through a triangular equilateral aperture. A new simple rule is proposed to find the topological charge, sign and value, based on the intensity profile of OAM diffracted beam.

**Keywords:** decoding, orbital angular momentum, optoelectronics, nanometric thickness film, fork hologram

## INTRODUCCIÓN

Haces ópticos con Momento Angular Orbital (MAO) poseen una estructura de fase de la forma  $e^{jm\theta}$  donde  $m$  es la carga topológica (CT) del haz, que puede tomar valores enteros (1). Estos haces tienen gran potencial para generar y mejorar, entre otras aplicaciones existentes en la ingeniería, las comunicaciones ópticas (2); ya que no se necesita interrumpir el haz de luz para el traspaso de datos, confiere inmunidad a la interferencia electro-

magnética, aumenta el ancho de banda, la tasa de transmisión y la capacidad de información transmitida por el canal, haciendo más eficiente el proceso de codificación (2). Debido a estas propiedades, es necesario, profundizar en el estudio de la detección de la carga topológica (CT). Dentro de las técnicas actuales están la interferometría (3, 4) y el tratamiento digital de imágenes (5, 6);

sin embargo, es posible encontrarla de una manera sencilla a partir del patrón de difracción asociado a una abertura triangular (7). Simulaciones numéricas y experimentales del patrón de difracción por un borde y en campo lejano de un haz con carga topológica entera, vis-

tera, son presentadas a continuación. De to desde una abertura triangular equilá-

esta manera se estudia la estructura de un sistema optoelectrónico que usa dichos patrones, basado en la adquisición de perfiles de intensidad que permiten discriminar la información contenida en el frente del haz MAO. Estudios recientes han estado enfocados a la determinación de la carga topológica en haces Bessel-Gauss (8).

**MATERIALES Y MÉTODOS**

Considere un haz Bessel-Gauss con carga topológica entera  $m$  como haz incidente, para el cual la descripción de la amplitud del campo está dada por (8):

$$U(\rho, \theta, z) = c e^{-\frac{\rho^2}{2w(z)}} e^{im\theta} \rho \left[ I_{\frac{m-1}{2}} \left( \frac{\rho^2}{2w^2(z)} \right) - I_{\frac{m+1}{2}} \left( \frac{\rho^2}{2w^2(z)} \right) \right] e^{i3\pi m \frac{z}{kz}}$$

Con  $c_0 = t \frac{\sqrt{\pi}}{2w_0} e^{-\frac{z}{z_r}}$  una constante,  $w(z)$  el radio del haz a la altura del plano de la abertura,  $R(z) = z[1 + (z/z_r)^2]$  el radio del frente de onda,  $z_r = kw_0^2/2$  el rango de Rayleigh,  $w_0$  la cintura del haz,  $k$  el número de onda del haz monocromático e  $I_{\frac{m-1}{2}}$  es la función modificada de

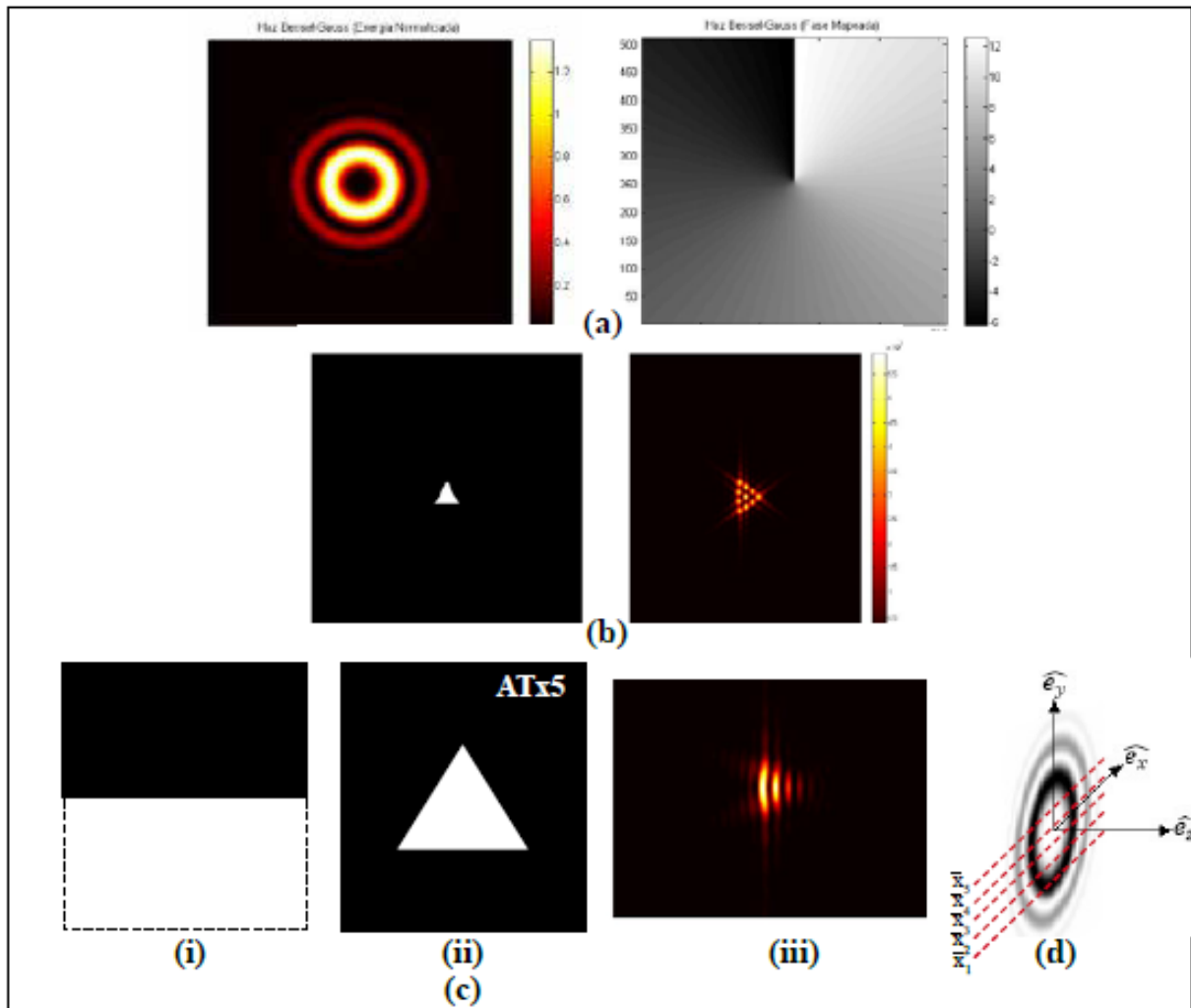


Figura 1. Magnitud y Fase de un haz Bessel-Gauss, con carga topológica  $m=3$ . (b) Patrón de difracción de un haz MAO con CT,  $m=3$ , al pasar a través de una abertura triangular equilátera. (c) Patrón de difracción de un haz MAO con carga topológica  $m=3$ , por un borde (i), usando para evaluar la carga topológica del haz una abertura triangular AT (ii) y los resultados de su simulación (iii). (d) Posiciones sucesivas verticales del borde nanométrico utilizado, respecto al vórtice óptico del haz MAO

Bessel. El término  $e^{im\theta}$  es el momento angular orbital, de manera que el valor de  $m$  indica, el número de rotaciones del frente de onda sobre el eje de propagación, es la carga topológica (ver Fig.1 (a)). Esta ecuación describe la distribución de campo a una distancia  $z = z_0$ , en donde se encuentra ubicada la abertura triangular equilátera AT, que proporciona, un método simple y sencillo para la determinación de la magnitud y el signo de la carga topológica del vórtice óptico, mediante el conteo de manchas luminosas a lo largo de uno de sus lados (7, 8) (ver Fig.1 (b)). Cuando el haz MAO se difracta en campo lejano por un borde nanométrico, centrado sobre el eje óptico del sistema, y visto a través de AT, se produce un patrón de líneas característico, que ofrece una interpretación alternativa para encontrar la magnitud y el signo del estado de fase de dicho haz (ver Fig.1 (c)). Desde la simulación, esto se logra a partir de zonas transparentes (1) y oscuras (0), que describen la vía libre o el obstáculo, respectivamente. Experimentalmente se fabricaron películas nanométricas, de transmitancia en intensidad muy cercana a cero ( $\text{TiO}_2$ ), crecidas sobre  $\text{SrTiO}_3$  pulidos por ambas caras, a una temperatura de  $500\text{ }^\circ\text{C}$  con una presión de  $2,0$  y  $2,5 \times 10^{-2}$  mbar en una atmósfera de Ar, y con una potencia de la fuente de deposición de  $50\text{ W}$ , con un tiempo de crecimiento de una hora, para producir un espesor comparable a la longitud de onda ( $\sim 660\text{ [nm]}$ ). El patrón de líneas en campo lejano, resultado de la interacción vórtice-borde visto con la ayuda de la apertura AT, es analizado a través del perfil de intensidad de la imagen adquirida por computador mediante una cámara CCD. Este evidencia disimetría horizontal variable, en

función de la posición del borde respecto del eje óptico. Por esta razón se realizó un barrido micrométrico reteniendo cinco posiciones verticales de la película (ver Fig. 1 (d)), con el fin de identificar la posición que ofrece mayor simetría. A partir del análisis de dichos perfiles se propone una regla de identificación basada en el conteo de máximos, referidos al máximo absoluto y entre picos laterales simétricos que, desde el punto de vista de su futura implementación, es automatizable.

## RESULTADOS

Numéricamente se obtienen, para la difracción en campo lejano (Transformada de Fourier del campo electromagnético difractado) del haz MAO con  $\text{CT}=3$  por el borde, para diferentes posiciones verticales relativas al eje óptico, los patrones de la Fig. 2. Se traza un perfil a los distintos patrones como se muestra en la Fig. 3., donde se verifica la disimetría existente. Se evalúa el error de simetría entre máximos laterales que aparentan ser simétricos, para las cinco posiciones del borde (etiquetadas como  $\bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{x}_3, \bar{x}_4, \bar{x}_5$ ) y se muestra en el Cuadro 1. Con este criterio se contrastan los perfiles de

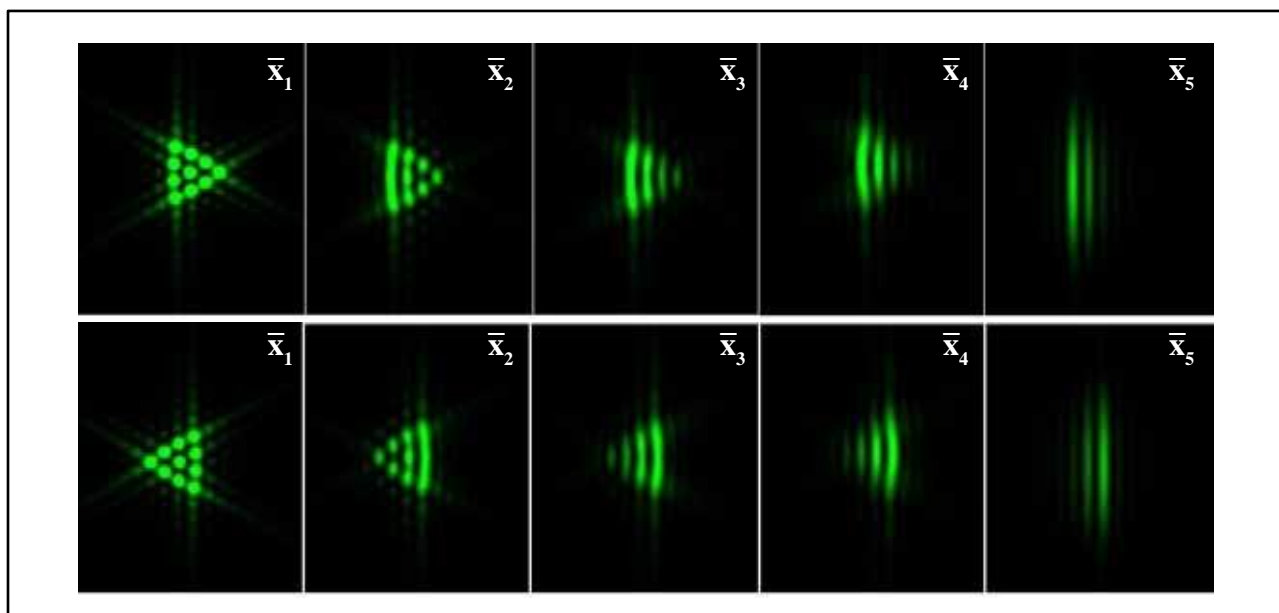


Figura 2. Figuras de difracción asociadas a las cargas topológicas  $m=\pm 3$  para cinco posiciones verticales relativas al vórtice óptico de un haz MAO

$\bar{x}_2$  y  $\bar{x}_4$ , de manera que al ver la posición del máximo global respecto al centro de la trama, es posible identificar el signo de la carga topológica, de manera fácil y efectiva en el perfil de  $\bar{x}_4$ . Numéricamente se hacen difractor haces MAO con CT desde  $m = \pm 1 \rightarrow \pm 5$ , obteniendo las figuras de difracción mostradas en la Fig. 4. La implementación experimental se realizó con el dispositivo esquematizado en la Fig. 5. Obteniendo las figuras de difracción de campo lejano mostradas en la Fig. 6. Una vez verificada la concordancia entre los perfiles obtenidos por simulación numérica y los obtenidos experimentalmente, se encuentran las medidas de disimetría que permiten proponer una nueva regla de identificación de CT:

$$CT = N_{mi} - 1; m_i > \gamma \pm \beta; \quad (2)$$

Donde  $N_{mi}$  representa el número de máximos, que cumplen la condición para  $m_i$ , mayor que el umbral  $\gamma$  con una tolerancia  $\beta$  (umbral de simetría).

## DISCUSIÓN

A partir de los resultados obtenidos es posible mejorar significativamente la técnica para la detección de la carga topológica, magnitud y signo, eliminando el uso de óptica adicional (reduciendo costos y tamaño físico a los dispositivos). La regla propuesta en la expresión (2) es sencilla y puede implementarse en tiempo real. El sistema estudiado hasta ahora, permite asociar ocho estados de fase en una combinación de qubits (establecidos a partir de la CT del haz,  $m = \pm 1 \rightarrow \pm 4$ ); evidenciando así, la ventaja en el aumento de la capacidad de información, ya que la transmisión a nivel de capa física no se daría bit a bit.

## CONCLUSIONES

Se demuestra la correspondencia entre las figuras de difracción de Fraunhofer

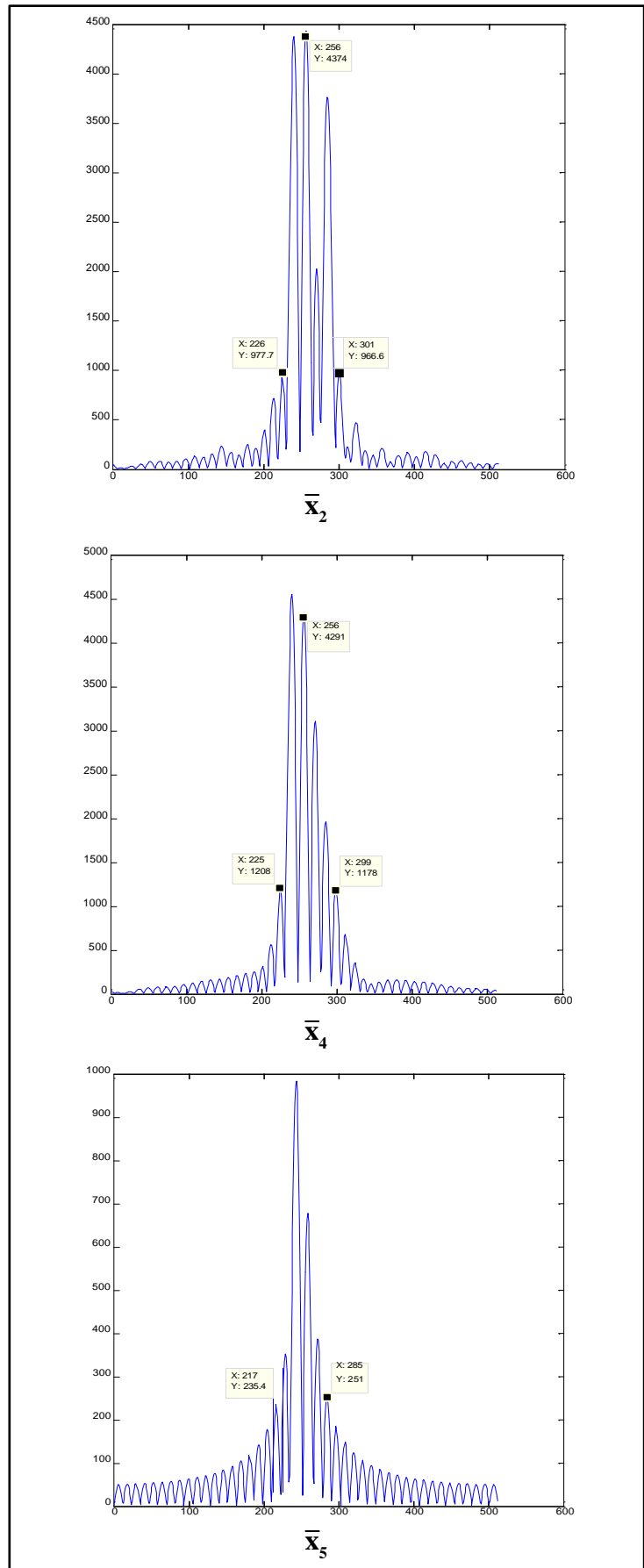


Figura 3. Perfiles horizontales de intensidad para los patrones de difracción asociados a la interacción del haz MAO con carga topológica tres positiva, por un borde nanométrico en tres posiciones diferentes, visto a través de la abertura triangular AT y al centro de la figura de difracción al vórtice óptico de un haz MAO

	Máximo Izquierdo	Máximo Derecho	Error de Simetría
$\bar{x}_1$	321,6	1026,0	68,65%
$\bar{x}_2$	977,7	966,6	1,13%
$\bar{x}_3$	1179,0	1239,0	4,8%
$\bar{x}_4$	1208,0	1178,0	2,48%
$\bar{x}_5$	865,0	773,3	10,60%

Cuadro 1. Error de simetría cuantificado entre los primeros lóbulos laterales coincidentes, respecto al centro para el perfil del patrón de difracción del haz con carga topológica tres positiva

obtenidas por simulación y las obtenidas experimentalmente para haces luminosos con MAO entero, por el borde de una película gruesa ( $>\lambda$ ) y de diferente espesor nanométrico.

Para haces MAO entero que difractan por el borde de la película gruesa y vistos a través de una abertura triangular equilateral, es posible discernir el valor de su carga topológica así

como su signo, a partir de la validación de la nueva regla propuesta para la determinación del estado de la fase del haz.

### AGRADECIMIENTOS

A la Vicerrectoría de Investigación y Extensión (VIE), de la Universidad Industrial de Santander por el apoyo al proyecto: “Descripción general alternativa del momento angular total, orbital y de spin, en óptica no-paraxial”, con código 1788. A Colciencias por su apoyo económico a través del proyecto. “Dispositivos ópticos de alta dimensionalidad QKD (Quantum Key Distribution) basados en el momento orbital de la luz”, código: 110256934957.

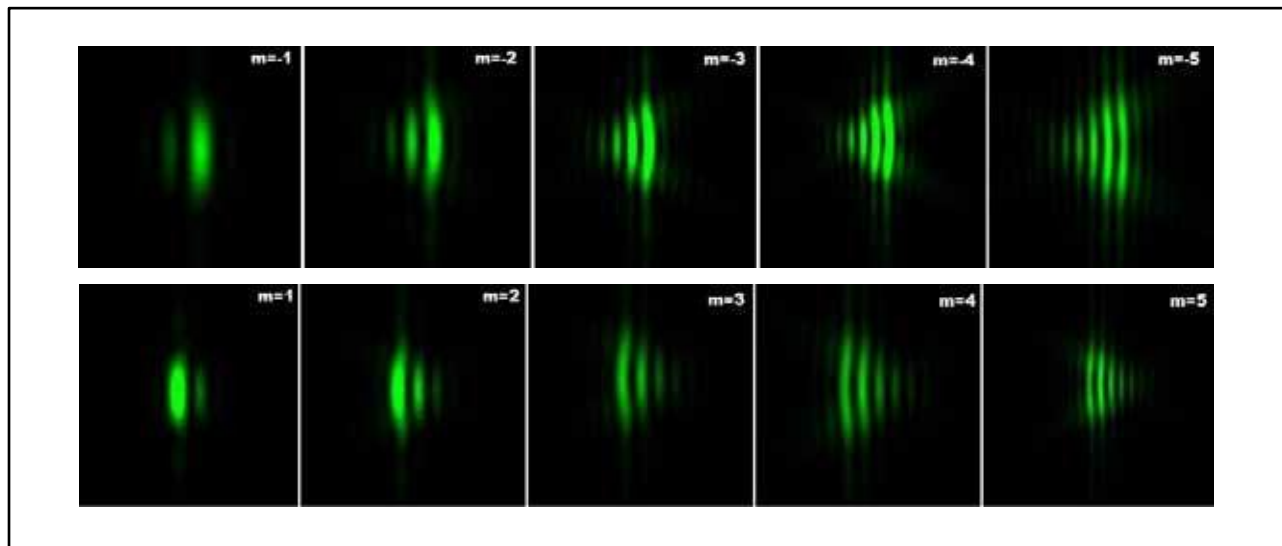


Figura 4. Difracción en campo lejano de un haz MAO entero,  $m=\pm 1 \rightarrow \pm 5$ , por el borde de la película gruesa, vista a través de AT (resultados simulados)

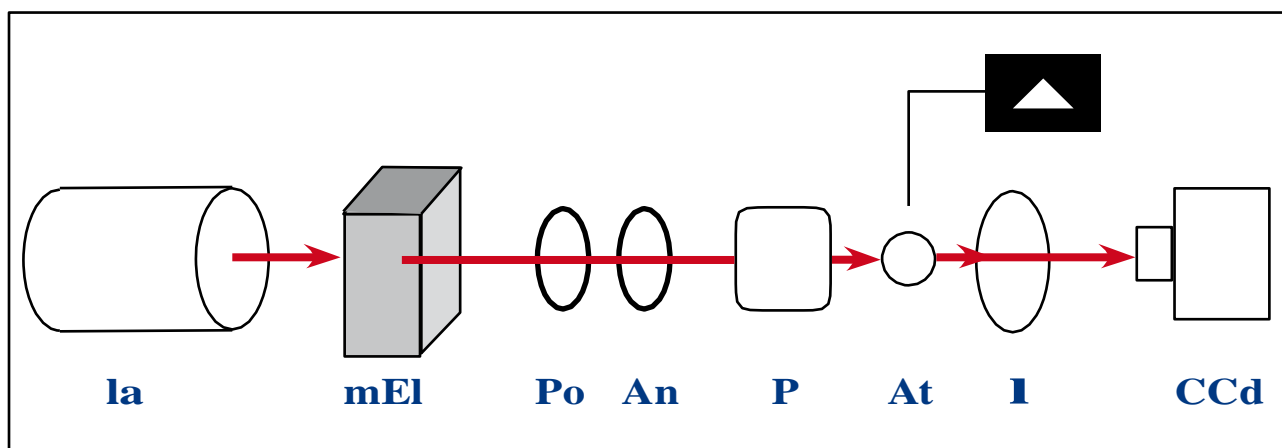


Figura 5. Esquema del montaje experimental: Láser (La), Modulador Espacial de Luz (mEl), Polarizador (Po), Analizador (An), La película gruesa (P), Abertura triangular (AT), Lente de Fourier (L) y cámara CCD

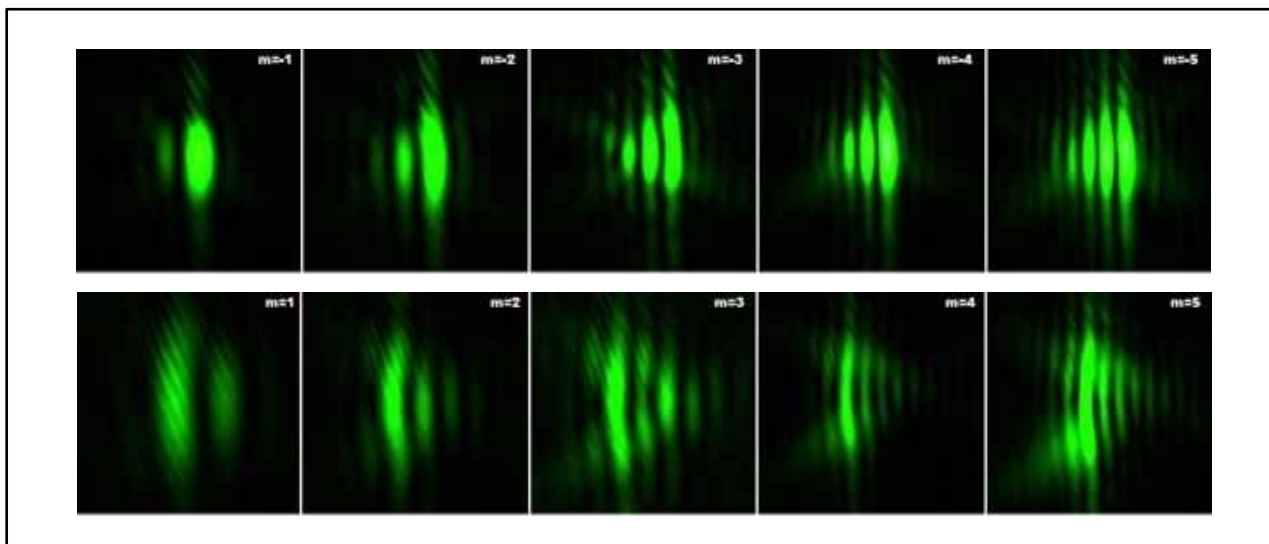


Figura 6. Difracción en campo lejano del haz MAO,  $m=\pm 1 \rightarrow \pm 5$ , por el borde de la película ( $T_i=0,2\%$ ); vista a través de AT

## Referencias

- Allen L, Beijersbergen M, Spreeuw R, Woerdman J. Orbital angular momentum of light and transformation of Laguerre-Gaussian Laser Modes. *Physical Review A*. 1992; 45(11): 8185-8189.
- Wang J et Al. Terabit free-space data transmission employing orbital angular momentum multiplexing. *Nature Photonics*. 2012; 6:488-496.
- Acevedo Cáceres, CH. Análisis Teórico-Experimental de un haz con Momento Angular Orbital. Trabajo de investigación en maestría en física. 1ª ed. Bucaramanga, Colombia. Facultad de Ciencias, Escuela de Física, Universidad Industrial de Santander-UIS; 2012.
- Acevedo CH, Díaz CF and Torres Y. Intensidad de un haz de luz con momento angular orbital entero y no entero en campo lejano. *Ingeniería y Desarrollo*, 2014; 32(2): 161-178.
- Díaz Meza, CF. Modelado de un Sistema Optoelectrónico para la Codificación de Información a través del Momento Angular Orbital de la Luz. Trabajo de investigación de maestría en ingeniería electrónica. 1ª ed. Bucaramanga, Colombia. Facultad de Ingeniería Físico-mecánicas, Escuela E3T, Universidad Industrial de Santander-UIS; 2012.
- Martelli P., Gatto A., Boffi P. and Martinelli M. Free-space optical transmission with orbital angular momentum division multiplexing, *Electronics Letters*. 2011; 47(17): 972-973.
- Hickmann JM, Fonseca EJS, Soares WC, Chávez-Cerda S. Unveiling a truncated optical lattice associated with a triangular aperture using light's orbital angular momentum. *Phys. Rev. Lett*. 2010; 105(5):053904-1-053904-4.
- Acevedo CH, Diaz CF, Torres-Moreno Y. Determinación de la carga topológica de un haz Bessel- Gauss mediante el patrón de difracción a través de una abertura triangular equilátera. *Dyna*, 2015; 82(190):214-220.