

Modificando el Perfil Espacial de la Luz con SLM (Spatial Light Modulator)

Cesar D. Millan V*
 Universidad de los Andes
 * cd.millan@uniandes.edu.co

Resumen

En este trabajo describe la forma de producir haces de luz con fases particulares por medio de un SLM (Spatial Light Modulator). La técnica usada es la holografía. Se presentan detalles del montaje experimental, en el que se generaron modos LG (Laguerre-Gauss) en diferentes órdenes. Los resultados experimentales se contrastan con simulados, confrontando teoría y experimentación. Se presentan haces por modulación arbitraria de fase.

I. Introducción

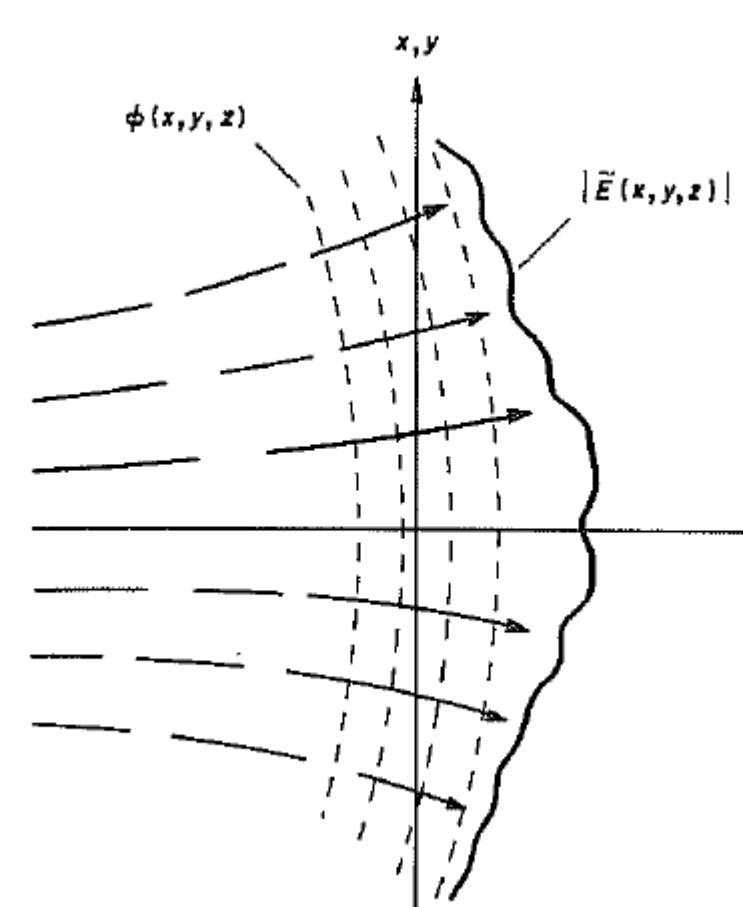
Conocer el perfil de intensidad espacial de la luz permite entender la evolución de propagación de un haz en el espacio libre o en un medio[1]. Es posible modificar la forma del haz de luz por la manipulación de su fase. Existen diferentes técnicas para modificar la fase, tales como la holografía. Los haces de luz con diferente forma presentan características particulares la manipulación de partículas[2], información cuántica y comunicación[3,4], la optimización de sensores como interferómetros detectores de ondas gravitacionales[5]. Se hace necesario establecer un método que permita generar haces con fase particulares.

Los haces o modos Laguerre-Gauss son un buen ejemplo de haces con vorticidad en su fase. Generar haces que presentan en su fase una vorticidad se hace de particular interés pues estos transportan momento angular[6]. Una técnica que permite modificar de manera deseada la fase en una haz es la holografía, que básicamente consiste en que por medio de una imagen reconstruye un haz. Un SLM (Spatial Light Modulator). Un SLM es un dispositivo opto-eléctrico que consiste de una pantalla de cristal liquido (LC) con la capacidad de modificar la amplitud y la fase de un haz.

II. Marco Teórico

Cualquier onda electromagnética en su propagación, en particular para el espacio libre esta descrita

$$\left(\nabla^2 - \frac{\partial^2}{\partial t^2}\right)\tilde{E}(x, y, z, t) = 0, \quad \text{si suponemos la propagación en dirección del eje } z, \text{ entonces podemos tomar a } \tilde{E} \text{ como}$$



$$\tilde{E}(x, y, z, t) = \tilde{u}(x, y, z) \exp(ikz - \omega t)$$

Como la difracción en el espacio libre conduce al ensañamiento de el patrón trasversal (ver figura1).

$$\frac{\partial^2 \tilde{u}}{\partial z^2} \ll \frac{\partial^2 \tilde{u}}{\partial x^2}, \frac{\partial^2 \tilde{u}}{\partial y^2}, 2ik \frac{\partial \tilde{u}}{\partial z}, \quad \text{Ecuación de onda paraxial}$$

$$\frac{\partial^2 \tilde{u}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \tilde{u}}{\partial y^2} + 2ik \frac{\partial \tilde{u}}{\partial z} = 0. \quad (1)$$

Figura 1: Aproximación paraxial. Tomadas de [7]

Familia infinita de soluciones de orden superior

Conjuntos de soluciones exactas y además convenientes matemáticamente a (1), hacen uso de polinomios, como los de Hermite H_n y de Laguerre L_p^m

$$\tilde{u}_n(x, z) = \left(\frac{2}{\pi}\right)^{1/4} \frac{\exp(i(2n+1)\psi(z))}{2^n n! w(z)} H_n\left(\frac{\sqrt{2}x}{w(z)}\right) \exp\left[ikz - \frac{ikx^2}{2R(z)} - \frac{x^2}{w^2(z)}\right]$$

$$\tilde{u}_p^m(r, \theta, z) = \sqrt{\frac{2p!}{1 + \delta_{0m}}} \frac{\exp(i(2p+m+1)(\psi(z) - \psi_0))}{w(z)} \left(\frac{\sqrt{2}r}{w(z)}\right) L_p^m\left(\frac{2r^2}{w^2(z)}\right) \exp\left[-\frac{ikr^2}{2R(z)} - im\theta\right]$$

Modos Laguerre- Gauss

Un haz que lleva un vórtice óptico presenta frentes de fase helicoidales que se manifiestan en la forma del haz con un centro oscuro. el termino $\exp(im\theta)$ indica la rotación de la fase y m es la carga topológica. El índice radial p genera discontinuidades radiales

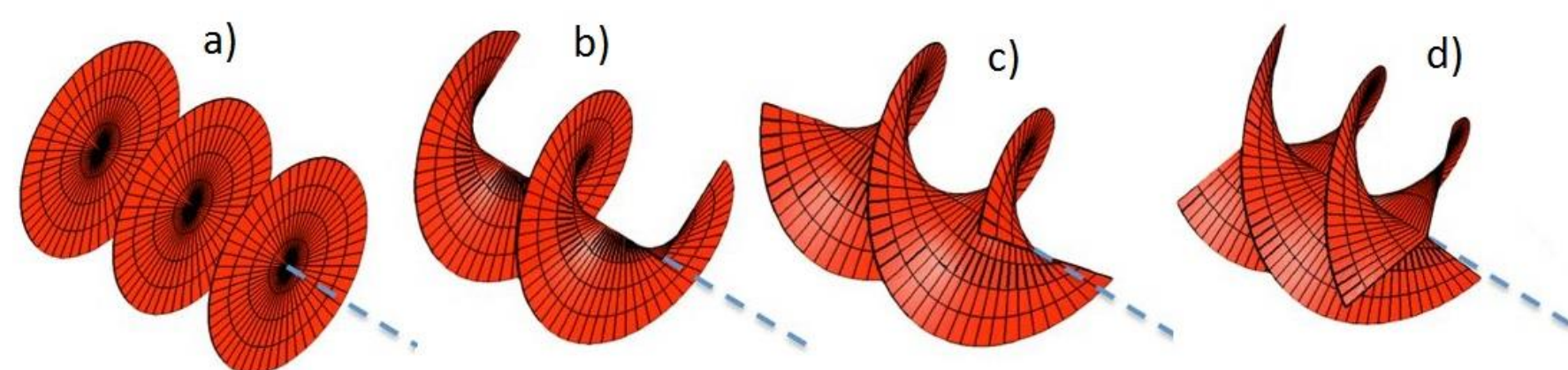


Figura 2: Rotación de la fase formando hélices. Carga topológica a) m = 0 que resulta en el modo Gaussiano. b) m = 1, c) m = 2, d) m = 3 Tomada y modificada de [8]

SLM (Spatial Light Modulator)

Un Modulador espacial de luz es un dispositivo opto-eléctrico que modifica en un haz de luz reflejado o transmitido la intensidad, la fase o el estado de polarización. Este dispositivo consiste en una pantalla de cristal liquido (liquid crystal display o LCD) donde se hace incidir un haz que en su reflexión o transmisión ha sido modificado

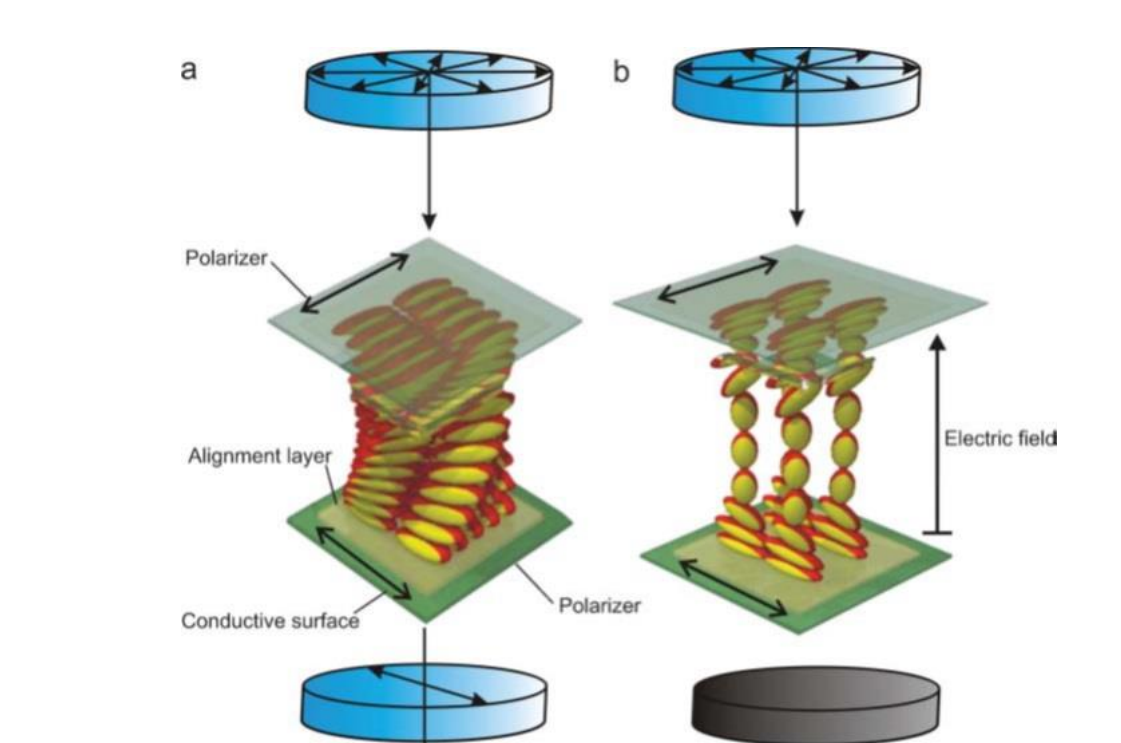


Figura 4: Principio de operación del CL Twisted-Nematic a) off-state. b) on-state. Tomada de [9]

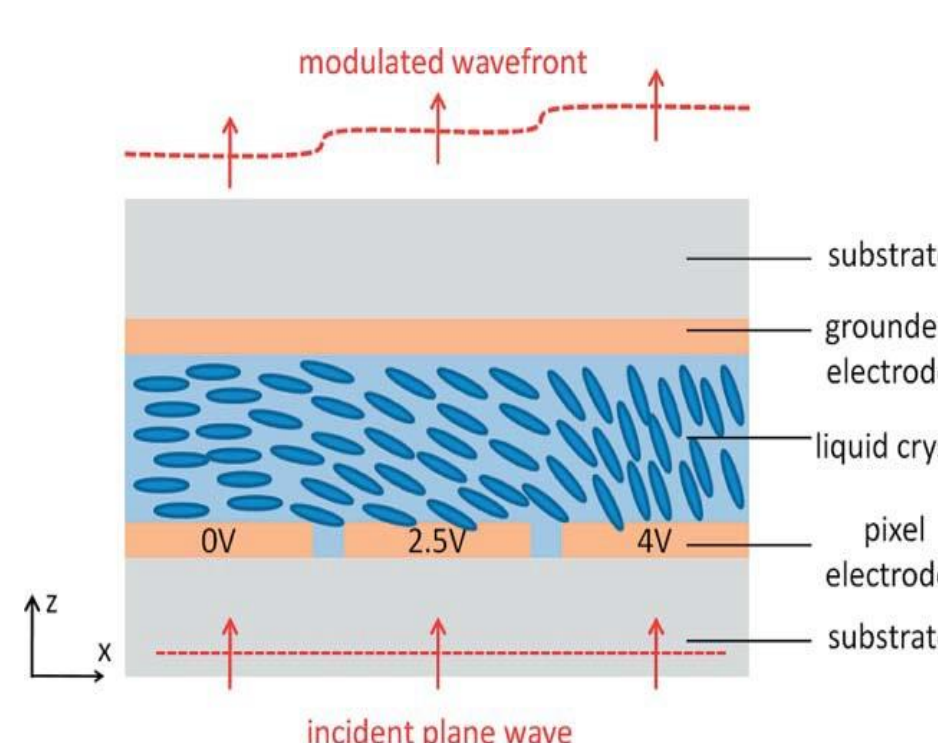


Figura 5: Frente de onda modulado de una onda polarizada en el eje x. Tomada de [10]

Figura 3: SLM SDE 1024 de Cambridge Correlators de la Universidad de los Andes

[3] J. P. Torres, Y. Deyanova, L. Torner, and G. Molina-Terriza, "Preparation of engineered two-photon entangled states for multidimensional quantum information," *Phys. Rev. A*, 2003.[4] A. Dudley, M. Lavery, M. Padgett, and A. Forbes, "Unraveling Bessel beams," *OPTICS & PHOTONICS NEWS*, vol. 24, no. 6, pp. 22–29, 2013. [5] S. Chelkowski, S. Hild, and A. Freise, "Prospects of higher-order Laguerre-Gauss modes in future gravitational wave detectors," *PHYSICAL REVIEW D*, vol. 79, no. 12, Jun. 2009.[6] L. Allen, M. W. Beijersbergen, R. J. C. Spreeuw, and J. P. Woerdman, "Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes," *PHYSICAL REVIEW A*, vol. 45, no. 11, Jun. 1992.[7] A. Siegman, *Lasers*, A. Kelly, Ed. University Science. Books, 1986. [8] M. Padgett, "Light's twist," *Proc. R. Soc. A*, vol. 470, no. 2172, Oct. 2014. [9] A. E. R. Johan Hoogboom, Theo Rasing and R. J. M. Nolte, "LCD alignment layers: controlling nematic domain properties," *Journal of Materials Chemistry*, vol. 16, pp. 1305–1314, 2006.[10] J. Beekman, K. Neyts, and V. Pieter J. M., "Liquid crystal photonic applications," *Optical Engineering*, vol. 50, no. 8, pp. 081 202–1 to 081 02–17, Aug. 2011.[11] E. J. Galvez, "Gaussian beams," department of Physics and astronomy Colgate University. [Online]. Available: <http://www.colgate.edu/portaldata/imagegallerywww/98c178dc-7e5b-4a04-b0a1-a73abf7f13d5/imagegallery/gaussian-beams.pdf>

III. Materiales y métodos

Se simula un patrón de intensidad de la interferencia y se le hace incidir un haz, por ejemplo Gaussiano, este en reflexión será el otro haz que generaría el patrón de intensidad, por ejemplo el Laguerre-Gauss. Así pues el patrón simulado tiene la información de la fase relativa de los dos haces. La anterior es precisamente la técnica conocida como holografía3.

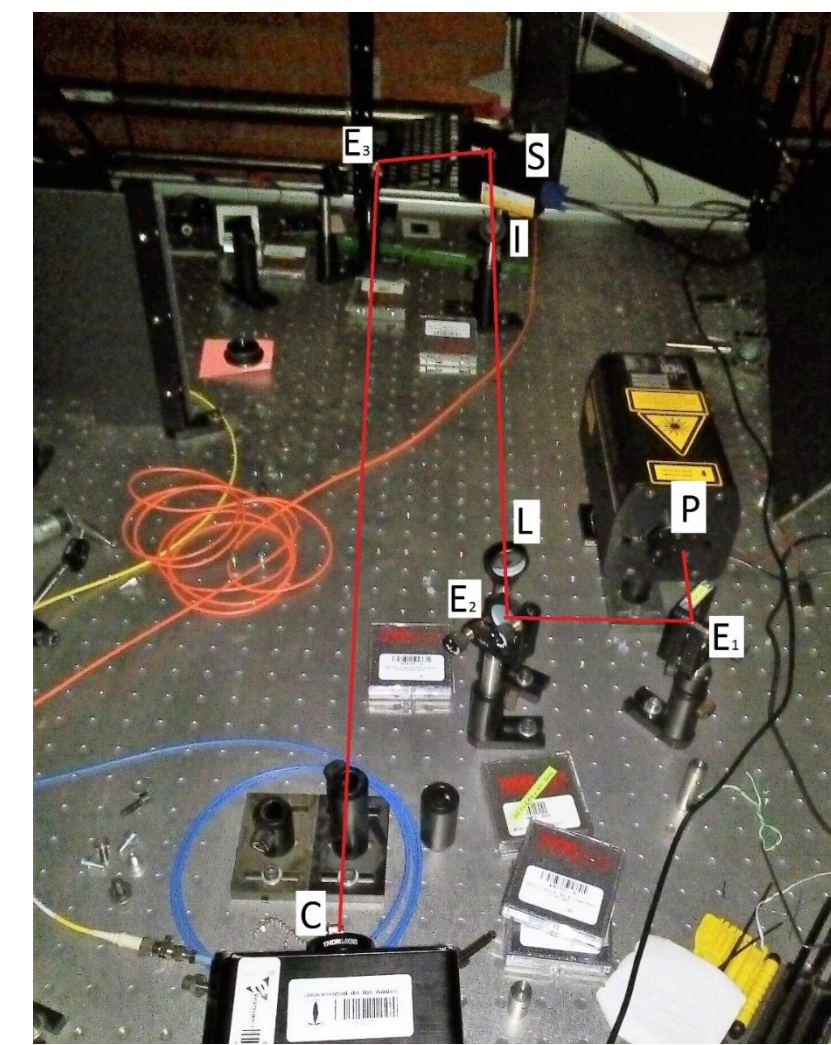


Figura 9: Montaje 1. que genera modos espaciales de luz por modificación de fase. P: Láser, E1,E2: Espejo plataforma fija, E3: Espejo plataforma abatible, L: Lente plano cóncavo de 500mm, I: Iris, S: SLM, C: CCD. En esta figura la línea roja indica el camino del haz de luz láser.

Montaje 1.

Se usa una fuente láser de 632nm de H-Ne (SC Láser de Thorlabs), dos espejos en plataforma fija y un tercero en plataforma abatible, lente: plano cóncavo de 500mm, computador, SLM (SDE 1024 de Cambridge Correlators) y una cámara CCD (Charge Coupled Device).

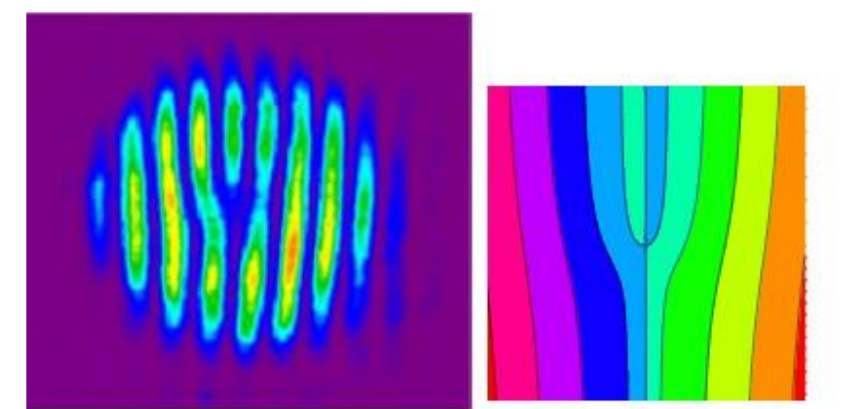


Figura 10: Izaq. Haz reflejado que cubre la pantalla del SLM. La imagen es la misma si el SLM esta o no activado. Cent. Imagen que se envía como segunda pantalla desde el computador. Der. Imagen de pantalla LCD del SLM.

Generación del patrón o rejilla de difracción

La función ContourPlot en el programa Mathematica permite visualizar los puntos para los cuales cual se tiene interferencia constructiva

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} x \sin \beta + m \arctan\left(\frac{x}{y}\right)$$



a) Patrón de interferencia, tomado de [11] b) Gráfica con la función ContourPlot que satisface todos los valores de x, y y m igual a 2π

Un programa en MATLAB para la generación de estas rejillas puede ser encontrado en <http://departments.colgate.edu/physics/research/optics/oamgp/ForkedDiffractionGrating.txt>.

Montaje 2.

Para el segundo montaje se eliminaron los espejos, y para el adecuado tamaño del haz se implemento un sistema telescópico Galileano, con la adición de un lente plano convexo de 200mm. Se disminuyó el ángulo de incidencia del haz en la pantalla a aproximadamente 9 grados. El haz salida directamente (sin pasar por los espejos) garantizando mayor intensidad

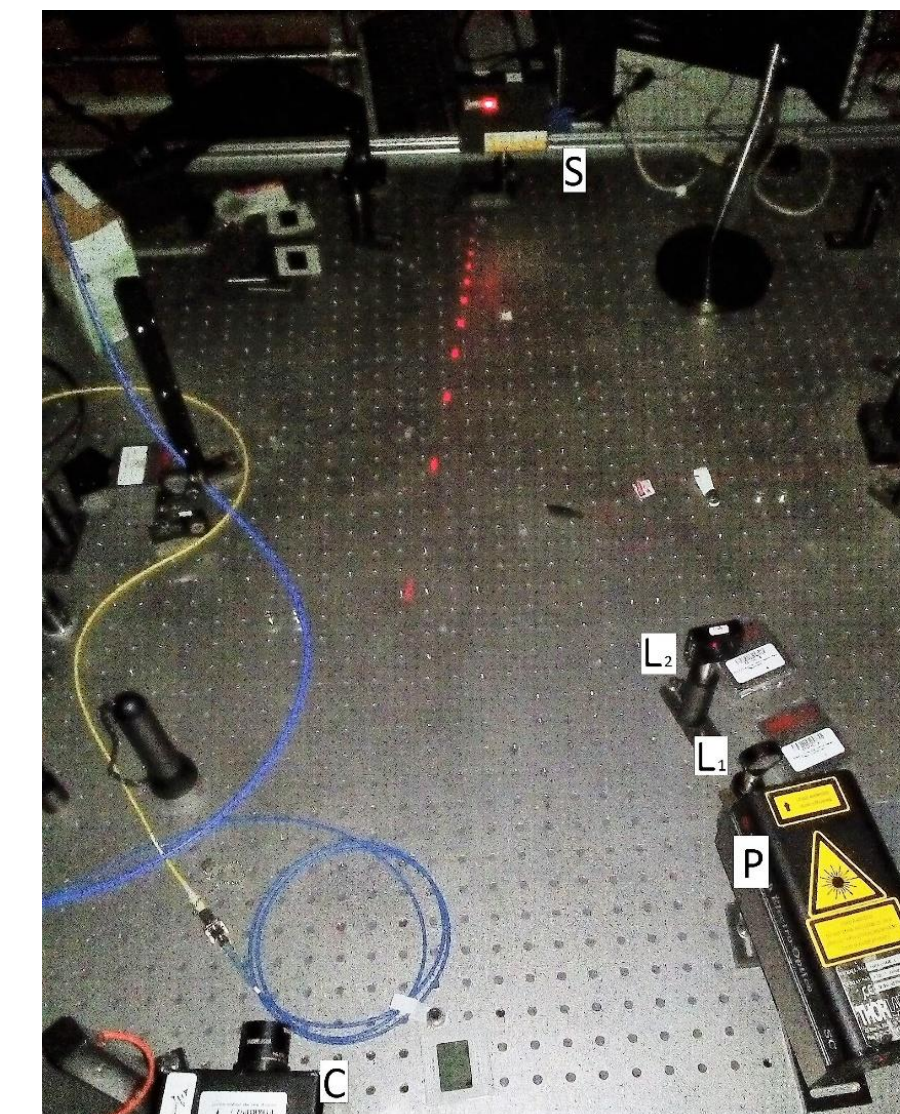


Figura 13: Montaje 2. que genera modos espaciales de luz por modificación de la fase. P: Láser, Sistema óptico Galileano: L1: Lente plano cóncavo de 500mm y L2: Lente plano convexo de 200mm, S: SLM, C: CCD.

IV. Resultados y Discusión

Se observo que para el primer montaje los modos que se producen se presentan deformes y no definidos suficientemente. Donde apenas era observable un patrón circular

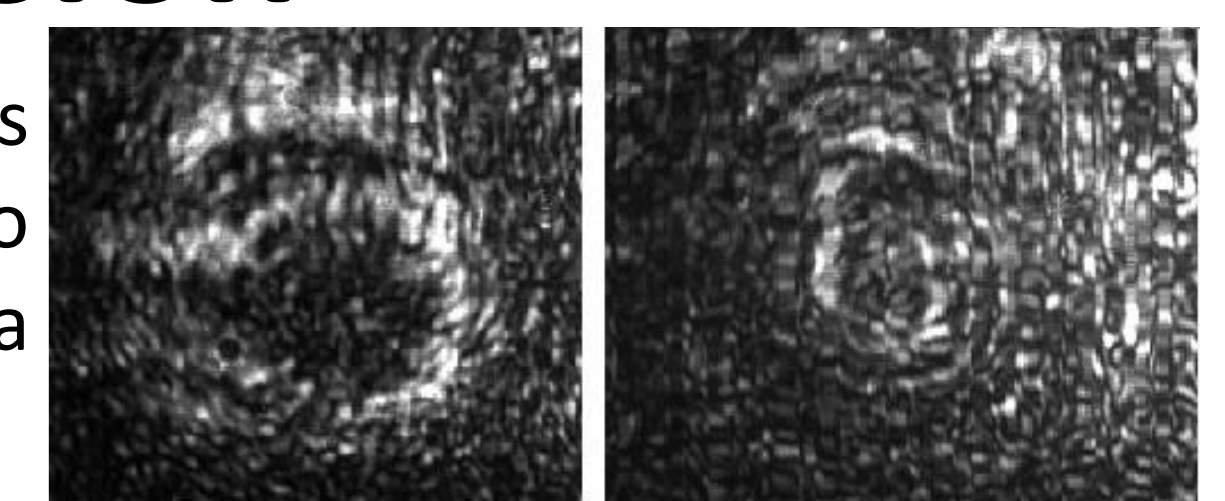


Figura 14: En montaje 1. a) Modo LG_0^3 , b) Modo LG_5^5

En el segundo montaje, los modos se presentaron con buena simetría y mejor definidos, lo anterior debido a la incidencia con un ángulo cercano a los 9 grados y del haz directamente a la pantalla del SLM.

a) Simulado. b) Registrado con CCD. c) Registrado con cámara fotográfica

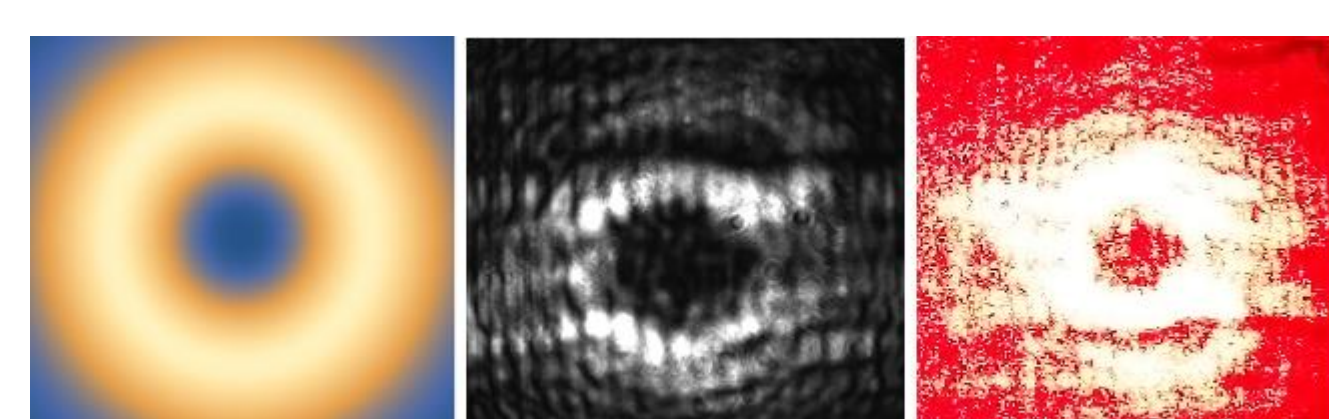


Figura 15: Modo LG_0^3

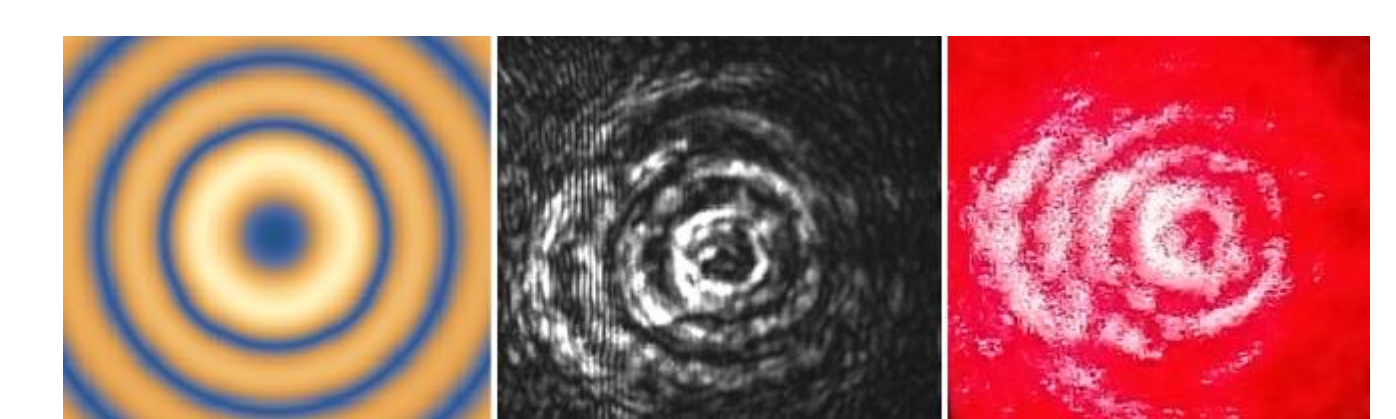


Figura 17: Modo LG_3^3

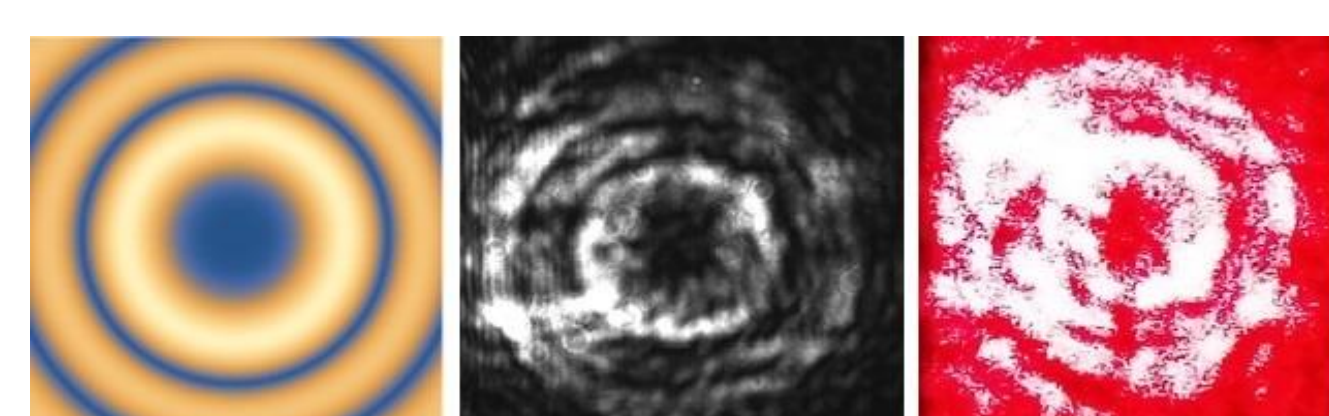


Figura 18: Modo LG_2^2

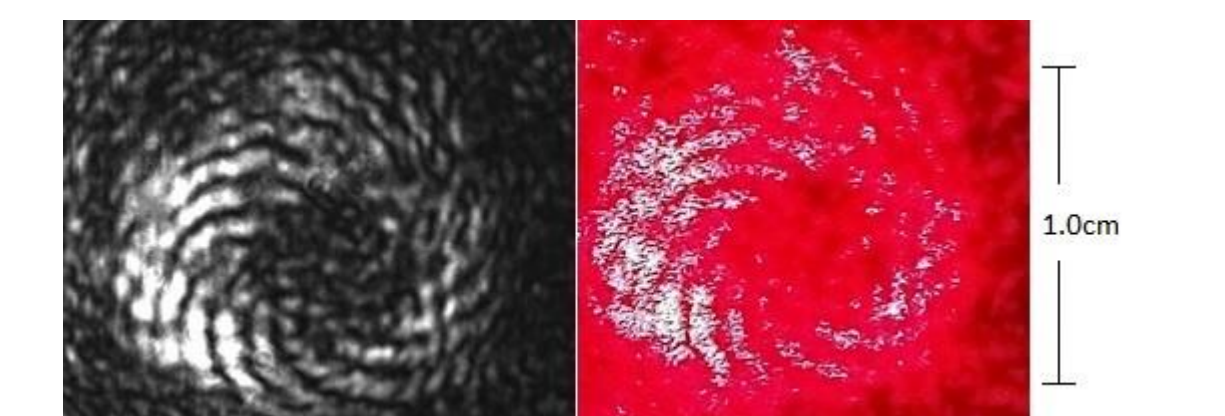


Figura 19: Manipulación de la fase de manera arbitraria

Referencias:

[1] R. Tudor, M. Kusko, C. Kusko, F. Craciunoiu, A. Avram, and D. V. A. Dinescu, "Beam shaping for phase singularities," *ROMANIAN JOURNAL OF INFORMATION SCIENCE AND TECHNOLOGY*, vol. 17, no. 4, p. 389 to 404, 2014. [2] A. Askin, Acceleration and trapping of particles by radiation pressure," *PHYSICAL REVIEW LETTERS*, vol. 24, no. 4, Jan. 1970. [3] S. Chelkowski, S. Hild, and A. Freise, "Prospects of higher-order Laguerre-Gauss modes in future gravitational wave detectors," *PHYSICAL REVIEW D*, vol. 79, no. 12, Jun. 2009.[4] L. Allen, M. W. Beijersbergen, R. J. C. Spreeuw, and J. P. Woerdman, "Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes," *PHYSICAL REVIEW A*, vol. 45, no. 11, Jun. 1992.[7] A. Siegman, *Lasers*, A. Kelly, Ed. University Science. Books, 1986. [8] M. Padgett, "Light's twist," *Proc. R. Soc. A*, vol. 470, no. 2172, Oct. 2014. [9] A. E. R. Johan Hoogboom, Theo Rasing and R. J. M. Nolte, "LCD alignment layers: controlling nematic domain properties," *Journal of Materials Chemistry*, vol. 16, pp. 1305–1314, 2006.[10] J. Beekman, K. Neyts, and V. Pieter J. M., "Liquid crystal photonic applications," *Optical Engineering*, vol. 50, no. 8, pp. 081 202–1 to 081 02–17, Aug. 2011.[11] E. J. Galvez, "Gaussian beams," department of Physics and astronomy Colgate University. [Online]. Available: <http://www.colgate.edu/portaldata/imagegallerywww/98c178dc-7e5b-4a04-b0a1-a73abf7f13d5/imagegallery/gaussian-beams.pdf>