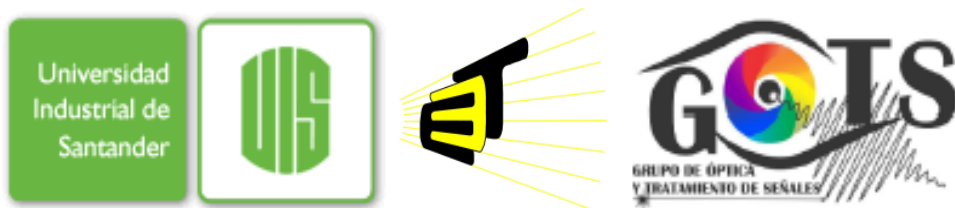


**SISTEMA OPTOELECTRÓNICO DE CODIFICACIÓN DE INFORMACIÓN  
BASADO EN VÓRTICES ÓPTICOS PERFECTOS CON MOMENTO ANGULAR  
ORBITAL.**

**DANIEL GALEANO VARGAS**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍA FÍSICO MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA ELECTRÓNICA Y DE  
TELECOMUNICACIONES  
BUCARAMANGA  
2018**

**SISTEMA OPTOELECTRÓNICO DE CODIFICACIÓN DE INFORMACIÓN  
BASADO EN VÓRTICES ÓPTICOS PERFECTOS CON MOMENTO  
ANGULAR ORBITAL.**

**DANIEL GALEANO VARGAS**

**Trabajo De Grado Para Optar El Título De Ingeniero Electrónico**

**Director**

**CRISTIAN ACEVEDO**

**Dr. Ciencias Naturales – Física**

**Codirector**

**YEZID TORRES MORENO**

**Dr. Óptica y Tratamiento de la Señal**

**Codirector**

**JAIME GUILLERMO BARRERO PÉREZ**

**Mg. En Ingeniería Electrónica**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍA FÍSICO MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA ELECTRÓNICA Y DE  
TELECOMUNICACIONES  
BUCARAMANGA**

**2018**

## CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	16
1. GENERALIDADES DEL PROYECTO	18
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	18
1.2 JUSTIFICACIÓN	18
1.3 OBJETIVOS	19
1.3.1 Objetivo general.	19
1.3.2 Objetivos específicos.	19
2. FUNDAMENTO TEÓRICO	20
2.1 MOMENTO ANGULAR ORBITAL DE UN HAZ LUMINOSO	20
2.2 VÓRTICES ÓPTICOS	21
2.3 VÓRTICES ÓPTICOS PERFECTOS	22
2.4 CORRELADOR 4-F	24
3. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL MONTAJE EXPERIMENTAL	26
3.1 HOLOGRAMAS COMPUTARIZADOS TIPO AXICÓN	26
3.2 GENERACIÓN DE VÓRTICES ÓPTICOS PERFECTOS	27
3.3 CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN DEL MONTAJE EXPERIMENTAL DEL SISTEMA 4F	29
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS	31
4.1 PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES	35

4.2 RESULTADOS OBTENIDOS EN LA DETECCIÓN DEL ESTADO DE SUPERPOSICIÓN DE VOPS	37
5. CONCLUSIONES	43
6. PERSPECTIVAS	44
7. PRODUCTOS ASOCIADOS	45
BIBLIOGRAFÍA	46
ANEXOS	53

*Dedicado a  
mi abuela, Ana Marina Vargas de Galeano,  
por los ejemplos de perseverancia y  
constancia que la caracterizan y que me ha  
inculcado siempre, por sus concejos, sus  
valores, sus oraciones, por la motivación  
constante que con su esfuerzo me ha  
permitido ser una persona de bien, y lo más  
importante por todo el amor que me brinda.*

*Mi abuelo Antonio Jesús Galeano Cortes  
por ser el pilar fundamental en todo lo que  
soy, por el valor mostrado para salir  
adelante y por su infinito amor.*

*Mi esposa Luz Dary Torres Torres por  
haberme apoyado en todo momento, por  
compartir sus días junto a mí, por su amor y  
cariño incondicional y lo más importante  
por haberme permitido ser el papá más feliz  
del mundo junto a nuestro hermoso hijo  
Matías Galeano Torres mi principal  
motivación que me llevó a seguir mis sueños  
hasta alcanzarlos.*

*Daniel Galeano Vargas*

## *AGRADECIMIENTOS*

A Dios por haberme permitido llegar hasta este punto por haberme dado la vida y salud para alcanzar mis metas, además de su infinito amor y bondad.

Al profesor Cristian Acevedo Cáceres, mi director y orientador por ser un gran profesional y una excelente persona, por brindarme la oportunidad de ser parte del grupo de investigación GOTS, por su apoyo, enseñanzas y tiempo dedicado a esta labor, porque gracias a él, hoy este sueño se hace realidad.

A los integrantes del grupo de investigación GOTS, por sus consejos y sus sugerencias para la realización de este proyecto, por brindarme la oportunidad de hacer parte de esa gran familia.

A mis compañeros de lucha, colegas y demás profesionales en formación, testigos de alegrías y tristezas, gracias por el valor de la amistad y por el apoyo incondicional que me brindaron.

A toda mi familia y amigos que creyeron en mí y de una u otra manera contribuyeron con este proceso, estaré eternamente agradecido.

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Esquema de frentes de onda helicoidales correspondientes a los valores de carga topológica de izquierda a derecha $m=3,2,1,0$ y $m=-1$ , respectivamente [31].	21
Figura 2. Imágenes numéricas de la intensidad (parte superior) y la fase (parte inferior) de vórtices ópticos con valores de carga topológica de izquierda a derecha $m=0,1,3$ y $m=5$ , respectivamente.	22
Figura 3. Simulaciones numéricas de la intensidad (parte superior) y la fase (parte inferior) de vórtices ópticos perfectos con valores de carga topológica de izquierda a derecha $m=0,1,3$ y $m=5$ respectivamente.	23
Figura 4. Perfiles teóricos de intensidad a lo largo de los centros de los vórtices ópticos perfectos con carga topológica $m=1, 2, 3, 5$ y $m= 10$ [34].	24
Figura 5. Esquema del sistema correlador optoelectrónico 4f para codificar y decodificar datos sobre la superposición de VOPs dinámicamente. MEL: Modulador espacial de luz; L: Lente de Fourier; P: Pupila; apertura circular y CCD, cámara CMOS.	25
Figura 6. Hologramas computarizados para valores de carga topológicas: a) $m = 9$ , b) superposición entre dos cargas topológicas, $m=1$ con $m=-9$ ;	27
Figura 7. Montaje experimental utilizado para la generación y observación de vórtices ópticos perfectos. L, laser; O, objetivo de microscopio; PH, Pinhole; A, abertura; LC, lente colimadora; P1, polarizador; LCD, dispositivo de cristal líquido; L1, Lente de Fourier; CCD, cámara CMOS.	28

- Figura 8. Vórtices ópticos perfectos teóricos (segunda fila) y experimentales (tercera fila y cuarta fila), para cargas topológicas con valores de  $m=1$ , 5, 10 y  $m=20$  respectivamente. 29
- Figura 9. Montaje experimental para la codificación de un vórtice óptico perfecto a través de un correlador 4f. L, laser; O, objetivo de microscopio; PH, Pinhole; A, abertura; LC, lente colimadora; P1, polarizador; LCD, dispositivo de cristal líquido; L1, Lente de Fourier; Pupila, Abertura circular; CCD, cámara CMOS. 30
- Figura 10. Resultados teóricos (segunda fila) y experimentales (tercera fila) del patrón de difracción entre una onda con el VOP y una onda plana a través del sistema correlador óptico 4f para cargas topológicas de valor  $m=1$ , 2, 5 y  $m=8$ . 31
- Figura 11. Superposición de vórtices ópticos perfectos teóricos (segunda fila) y experimentales (tercera fila) resultantes de la superposición para cargas topológicas  $m=1$  como carga fija y una segunda carga topológica variable de valor  $m=-1,-3,-5$  y  $m=-27$  capturados en el plano de salida del correlador 4f. 32
- Figura 12. Resultados teóricos (primera fila) y experimentales (segunda fila) de la propagación de las imágenes mostradas en la figura 11 para una carga topológica fija  $m=1$  y los valores de carga topológica negativa de  $m=-1,-3,-5$  y  $m=-7$  obtenidas en el plano de salida correlador 4f. 33
- Figura 13. Patrón de interferencia de un VOP generado a partir de la superposición de dos cargas topológicas utilizando distintos valores para la carga topológica fija tales como  $m=1, 2, 3, 4, 5$  y  $m=6$ , con valores para la carga variable de  $m=-1$  obtenidas en el plano de salida del correlador 4f. 34
- Figura 14. Etapas del procesamiento digital de imágenes. 35
- Figura 15. Condiciones de iluminación del laboratorio elegidas para realizar los experimentos en la detección de estados de la superposición de VOPs. 36

Figura 16. Procesamiento digital de imágenes. Imágenes binarizadas (segunda fila) e imágenes filtradas (tercera fila) para valores de carga topológica fija de  $m=1$  y cargas topológicas variables de  $m=-1, -5, -9$  y  $m=-27$ . 37

Figura 17. Porcentaje de efectividad y error en la detección de cargas topológicas. 39

Figura 18. Porcentaje de error en detección de carga topológica para cada uno de los radios medidos en píxeles del filtro circular. 39

Figura 19. Resultados obtenidos para los dos tipos de errores presentados en la verificación de carga topológica. 40

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Condiciones de iluminación del laboratorio en donde se realizaron los experimentos (parte izquierda) y su respectivo umbral de binarización (parte derecha).	35
Tabla 2. Asignación del alfabeto sobre los vórtices ópticos perfectos con momento angular orbital.	41
Tabla 3. Especificaciones técnicas del láser He Ne.	53
Tabla 4. Especificaciones de la matriz de cristal líquido TN-LCD SONY LCX038ARA.	53
Tabla 5. Propiedades de la cámara CMOS EO-1312C.	53
Tabla 6. Especificaciones técnicas de los equipos de cómputo.	54

## LISTA DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
ANEXO A. DISPOSITIVOS Y SOFTWARE UTILIZADOS	53
ANEXO B. ALGORITMO DE CODIFICACIÓN DE INFORMACIÓN	55
ANEXO C. ALGORITMO DE ADQUISICIÓN DE IMÁGENES	56
ANEXO D. ALGORITMO DE PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES	57

## RESUMEN

**TÍTULO:** SISTEMA OPTOELECTRÓNICO DE CODIFICACIÓN DE INFORMACIÓN BASADO EN VÓRTICES ÓPTICOS PERFECTOS CON MOMENTO ANGULAR ORBITAL \*

**AUTOR:** DANIEL GALEANO VARGAS\*\*

**PALABRAS CLAVE:** Momento Angular Orbital, Vórtice Óptico Perfecto, Carga Topológica.

### DESCRIPCIÓN:

El momento angular orbital de un haz luminoso está referido a las rotaciones del frente de onda del haz propagándose en un medio. Estas rotaciones del frente de onda están asociadas a las singularidades de fase contenidas en un haz con momento angular orbital, las cuales son útiles en comunicaciones ópticas en el espacio libre y confinado, debido a su potencialidad para aumentar la cadencia de información en un canal de comunicaciones. De acuerdo con lo anterior, en el presente trabajo de investigación se desarrolla e implementa un prototipo de un sistema dinámico de codificación de información en el régimen visible utilizando la difracción por una abertura circular para la superposición de vórtices ópticos perfectos con momento angular orbital en un sistema de correlación óptica 4f. Los vórtices ópticos perfectos han sido generados utilizando máscaras holográficas en amplitud, las cuales son desplegadas en un modulador espacial de luz por transmisión modelo SONY LCX038ARA optimizado en el modo de amplitud acoplada y fase pura. Además, se presenta el criterio utilizado para la codificación de datos sobre el momento angular orbital basados en los resultados obtenidos en la difracción, como también el conjunto de técnicas aplicadas a las imágenes digitales utilizadas con el fin de mejorar la calidad de la imagen recuperada y facilitar la búsqueda de información contenida. Para los resultados obtenidos en la detección de cargas topológicas en donde se realiza un análisis de los datos, se presentan porcentajes de efectividad en detección, se clasifican los tipos de errores y el porcentaje de ocurrencia de cada uno de ellos y finalmente, se da a conocer el alfabeto asignado a cada valor de carga topológica para la codificación de información utilizando el momento angular orbital.

---

\*Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico - Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones (E3T). Director: Dr. Cristian Acevedo, Codirector: Dr. Yezid Torres Moreno Codirector: Msc. Jaime Guillermo Pérez

## ABSTRACT

**TITLE:** OPTOELECTRONIC SYSTEM OF INFORMATION CODING BASED ON PERFECT OPTICAL VORTICES WITH ORBITAL ANGULAR MOMENTUM \*

**AUTHOR:** DANIEL GALEANO VARGAS\*\*

**KEYWORDS:** Orbital Angular Momentum, Perfect Optical Vortices, Topological Charge.

### DESCRIPTION:

The orbital angular momentum of a beam of light is referred to the wavefront rotations of the beam propagating in a space. These wavefront rotations are related to the singularities of phase contained by a beam with orbital angular momentum, which are useful for optical communications in a free and confined space, due to its potential to increase the speed at which the data are sent onto a communication channel. Hence, this project of investigation develops and performs a prototype of a dynamic information coding system using the diffraction pattern through a circular aperture for the superposition of perfect optical vortices with orbital angular momentum in a 4f system of optic correlation. The perfect optical vortices are produced by holographic masks in amplitude, which are displayed in a transmission liquid crystal spatial light modulator model SONY LCX038ARA optimized in a coupled amplitude and a pure phase. In addition, is presented in this document the criterion that has been used to encode the data over the orbital angular momentum based on the results from the diffraction, as well as the grouping of techniques applied to the digital images that are being used with the purpose of getting a better image and offering an easiest way to search for information regarding the product. The results obtained by the detection of topological charges where an analysis of information is made and they are sorted by percentages effectiveness of detection system, type of bugs and occurrence percentages for each of them and finally, is made known the alphabet assigned to each topological charge value for the information coding using the orbital angular momentum.

---

\* Bachelor Thesis

\*\* Facultad de Ingenierías Físico - Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones (E3T). Director: Dr. Cristian Acevedo, Codirector: Dr. Yezid Torres Moreno Codirector: Msc. Jaime Guillermo Pérez

## INTRODUCCIÓN

El momento angular orbital (MAO) de un haz luminoso es una propiedad asociada a la dinámica rotacional del frente de onda del campo electromagnético del haz sobre su eje de propagación [6,30]. Esta propiedad espacial de las ondas electromagnéticas ofrece potenciales aplicaciones en los campos de la manipulación de materia [37], holografía [32,40,43,45], microscopía [44,32], entre otras aplicaciones [22]. Sin embargo, es en el campo de las comunicaciones en el espacio libre [11,19,27,48] y confinado [16,35,39,41], donde los haces con una estructura helicoidal presentan mayor aplicabilidad debido a la propiedad única de aumento en la capacidad del canal de información y su multiplexación [42,47].

En el caso de las comunicaciones ópticas utilizando momento angular orbital ha sido probado teóricamente que, debido al conjunto en principio infinito de estados con MAO, es posible codificar una cantidad infinita de información tanto a nivel de pocos fotones [13] como a nivel de una onda electromagnética [25,49,50]. Un sistema de información óptico basado en haces con MAO utiliza haces helicoidales con diferentes valores de carga topológica (CT) para codificar información en el espacio libre. En estos sistemas es elegido un conjunto de estados helicoidales como conjunto base, de manera que la existencia de uno de estos estados es asumida como un bit "1" y la ausencia de uno de estos estados es tomada como un bit "0". Por tanto, la combinación y transferencia de varios estados helicoidales representará la transmisión de un sistema binario de información [2].

No obstante, la propagación y decodificación de diferentes estados luminosos con MAO está sujeta a la dificultad propia de los fenómenos de difracción inherente de la luz y a la dificultad de distinguir la carga topológica transportada por el haz MAO, respectivamente. Parte de estas dificultades pueden ser resueltas sí para la propagación de información son usados vórtices ópticos perfectos (VOPs) y sí para

llevar a cabo la decodificación de estados con MAO, se utiliza el patrón de difracción característico de un haz con MAO bien definido a través de aberturas tales como una abertura circular [1], triangular [34] o pentagonal.

De acuerdo con lo anterior, en el presente trabajo de investigación de pregrado se implementó un nuevo prototipo de sistema de codificación de datos basado en un sistema de correlación optoelectrónico 4f utilizando la superposición de vórtices ópticos perfectos con momento angular orbital bien definido [26,28,34], los cuales fueron generados utilizando una matriz de cristal líquido modelo SONY LCX038ARA calibrada en el modo acoplado en intensidad [9-10] y modo fase pura [20-21]. Para llevar a cabo lo mencionado anteriormente, este libro ha sido organizado en cinco secciones. En la primera sección se muestran las generalidades del proyecto de investigación. Por otra parte, en la segunda sección se describen las principales características del momento angular orbital, VOPs y del sistema correlador 4f implementado en el proyecto. En la tercera sección se describe el diseño experimental para la generación de los VOPs y se realiza la construcción e implementación del sistema 4f. En la cuarta sección, se realiza el análisis de resultados experimentales obtenidos y se comparan con los obtenidos teóricamente. Finalmente, en la última sección se muestran las conclusiones del presente trabajo de investigación.

## **1. GENERALIDADES DEL PROYECTO**

### **1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

El estudio de los haces con momento angular orbital ha mostrado su gran utilidad como herramienta aplicada en diferentes campos de aplicación entre ellos la codificación de información, siendo esta aplicación importante para el aumento de la cadencia de la información y es allí, en donde la problemática se centra en la necesidad que tienen los sistemas de comunicación para desarrollar nuevas tecnologías que permitan un incremento en la tasa de transmisión de datos y una mayor seguridad en el manejo de la información.

### **1.2 JUSTIFICACIÓN**

En el presente trabajo de grado se propone implementar un sistema optoelectrónico de codificación y transmisión de datos basado en la superposición de vórtices ópticos perfectos con momento angular orbital bien definido, es decir, se desea diseñar, construir y desplegar hologramas generados por computador con la superposición de vórtices ópticos perfectos sobre una matriz de cristal líquido modelo SONY LCX038ARA optimizada en el modo acoplada en amplitud, y posteriormente transmitirlos en el espacio libre utilizando un sistema de correlación optoelectrónico 4f.

El anterior sistema de codificación y transmisión de datos se constituye en un sistema novedoso que será base para ulteriores investigaciones y aplicaciones en el campo de las comunicaciones ópticas a llevarse a cabo al interior del grupo de óptica y tratamiento de señales GOTS, en asocio con la Escuela de Ingenierías Eléctrica Electrónica y de Telecomunicaciones E3T, de la Universidad Industrial de Santander.

### 1.3 OBJETIVOS

**1.3.1 Objetivo general.** Desarrollar e implementar un prototipo de un sistema dinámico de codificación de información basado en vórtices ópticos perfectos para transmitir datos sobre un haz luminoso con momento angular orbital en el régimen visible utilizando un correlador optoelectrónico 4f en el espacio libre.

**1.3.2 Objetivos específicos.** El cumplimiento del objetivo general del trabajo de grado comprende:

- Analizar las propiedades ópticas de una onda electromagnética con momento angular orbital para la codificación y transmisión de información en el espacio libre.
- A partir de simulaciones numéricas, desarrollar un prototipo de un sistema dinámico de codificación de datos basado en la superposición de vórtices ópticos perfectos con momento angular orbital bien definido.
- Diseñar, construir y desplegar dinámicamente hologramas generados por computador para producir la superposición de vórtices ópticos perfectos con momento angular bien definido sobre una matriz de cristal líquido modelo SONY LCX038ARA.
- Diseñar, construir e implementar experimentalmente un sistema optoelectrónico de correlación 4f para la transmisión de datos utilizando la superposición de vórtices ópticos perfectos con momento angular bien definido.

## 2. FUNDAMENTO TEÓRICO

### 2.1 MOMENTO ANGULAR ORBITAL DE UN HAZ LUMINOSO

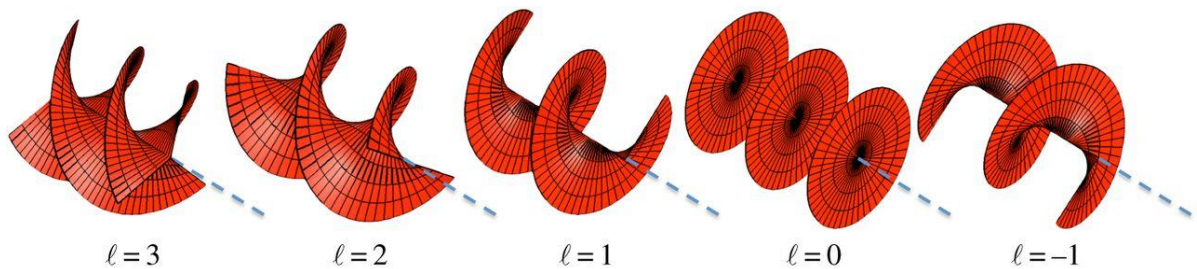
El momento angular orbital de la luz ha jugado un papel importante en el electromagnetismo desde los primeros escritos de Maxwell [23]. A partir de la descripción de un haz luminoso como oscilaciones transversales de los campos eléctricos y magnéticos viajando a velocidad  $c$  mostrada por Maxwell, Poynting demostró que una onda electromagnética posee un momento lineal y un flujo de energía bien definido. Adicionalmente, Poynting demostró analíticamente que el torque ejercido por un haz de luz con polarización circular sobre cualquier objeto tiene un valor cuantizado [24]. Sin embargo, Beth en 1936 demostró experimentalmente que un haz luminoso polarizado circularmente posee momento angular spin finito midiendo el torque ejercido por un haz luminoso sobre una lámina birrefringente suspendida sobre un espejo [38].

No obstante, solo fue hasta 1992 con el trabajo de Allen et al [30], cuando se comienza a estudiar el momento angular orbital de ondas electromagnéticas en el régimen visible y se prueba que este tipo de haces luminosos poseen momento angular orbital bien definido por un valor del índice azimutal o carga topológica  $m$  [30]. Desde entonces, el estudio de los haces con momento angular orbital ha mostrado su gran utilidad como herramienta aplicada en los campos de manipulación de materia [36], procesamiento de imágenes [7,29,44], holografía [32,40,43,45], industria de metales [4] y codificación de información [3,12,14]. Siendo esta última aplicación importante para el aumento de la cadencia de la información en un canal de comunicación.

Un haz con momento angular orbital rota sobre su propagación en un medio debido a las características de su frente de onda alrededor de su eje óptico [6,30], (véase *figura 1*). Los haces con MAO se caracterizan por que en su estructura de onda

electromagnética está presente un término exponencial de la forma  $\exp[im\theta]$  donde  $\theta$  es el ángulo acimutal y que varía entre 0 y  $2\pi$ , mientras  $m$  es la carga topológica, la cual representa los frentes de onda helicoidales entrelazados entre sí, es decir  $m$  es el número entero de veces de la onda electromagnética rotando sobre su eje de propagación en una distancia igual a su longitud de onda [8].

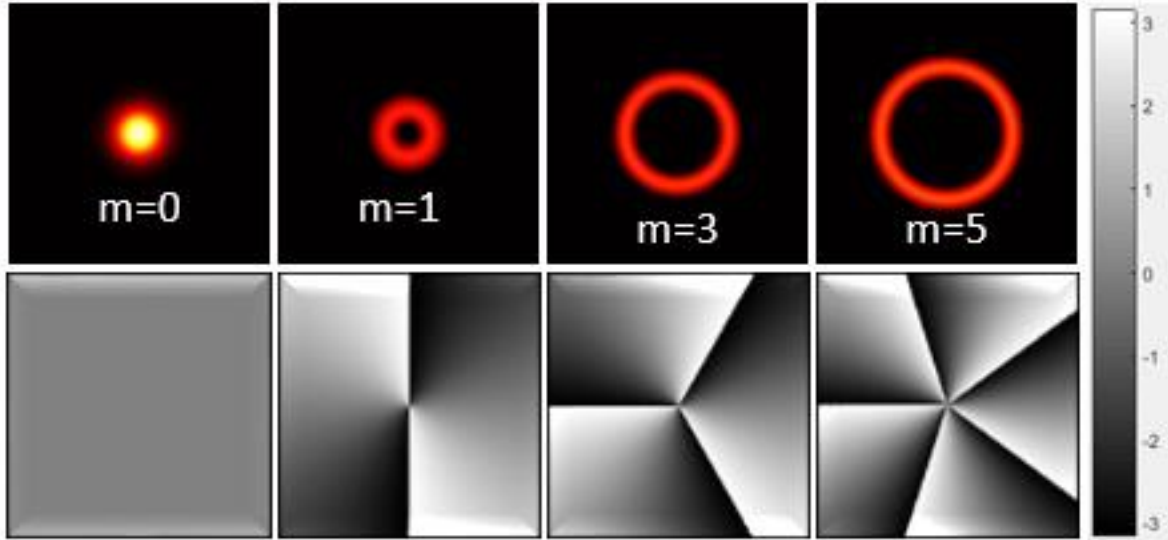
**Figura 1. Esquema de frentes de onda helicoidales correspondientes a los valores de carga topológica de izquierda a derecha  $m=l=3,2,1,0$  y  $m=-1$ , respectivamente [31].**



## 2.2 VÓRTICES ÓPTICOS

Un vórtice óptico es la distribución de campo electromagnético más sencilla que posee un valor de MAO bien definido. En estas distribuciones de campo electromagnético aparece la bien conocida singularidad de fase e intensidad nula en el centro del haz [17,18,33,37,46], tal como se aprecia en la primera fila de la figura 2. Además, de la primera fila de la figura 2 puede notarse como a medida que la carga topológica se incrementa, el radio y consecuentemente, el diámetro del anillo característico en los vórtices ópticos también aumenta. De esta manera puede observarse que el vórtice con carga topológica  $m=5$  tiene un mayor radio que el valor obtenido para el vórtice con carga topológica  $m=1$ .

**Figura 2.** Imágenes numéricas de la intensidad (parte superior) y la fase (parte inferior) de vórtices ópticos con valores de carga topológica de izquierda a derecha  $m=0,1,3$  y  $m=5$ , respectivamente.



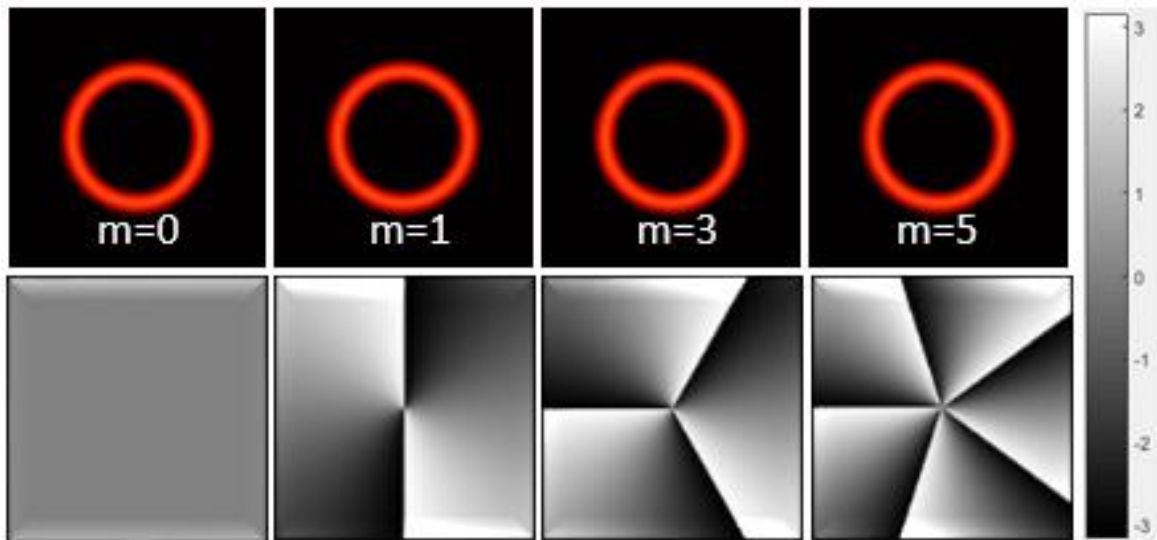
### 2.3 VÓRTICES ÓPTICOS PERFECTOS

De la sección 2.2 puede notarse como las dimensiones geométricas de un vórtice óptico cambian con el valor de carga topológica. Esta característica intrínseca en los campos electromagnéticos con MAO impone dificultades en las comunicaciones ópticas ya que limita el posible número de modos a ser usados en la codificación de información [10,24,49]. Por tal razón es introducido el concepto de vórtices ópticos perfectos (VOP), los cuales poseen dimensiones geométricas invariantes al valor de carga topológica [5,34], es decir el radio y ancho del anillo promedio del haz no dependen de la carga topológica presente en el haz (véase *figura 3*). Los VOPs pueden ser obtenidos utilizando la transformada de Fourier de los haces tipo Bessel-Gauss dados por:

$$E(\rho, \phi, z) = J_m(k_r \rho) \exp(im\phi) \exp\left(-\rho^2/w^2\right), \quad (1)$$

Donde  $J_m(\cdot)$  es la función de Bessel de primera especie de orden  $m$  [15],  $k_r$  y  $k_z$  son los números de onda radial y longitudinal respectivamente, además  $k = \sqrt{k_r^2 + k_z^2} = \frac{2\pi}{\lambda}$ , siendo  $\lambda$  la longitud de onda [34], mientras que  $w$  es el diámetro de la onda EM Gaussiana en la distancia. A partir de la transformación espacial de Fourier se demuestra que un VOP puede ser obtenido en campo lejano utilizando una distribución de onda electromagnética tipo Bessel – Gauss [34].

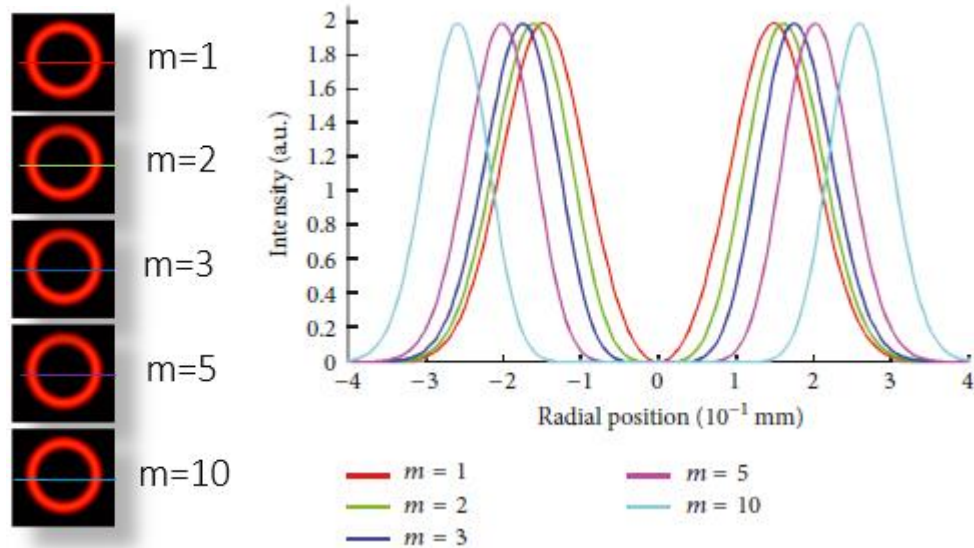
**Figura 3. Simulaciones numéricas de la intensidad (parte superior) y la fase (parte inferior) de vórtices ópticos perfectos con valores de carga topológica de izquierda a derecha  $m=0,1,3$  y  $m=5$  respectivamente.**



La figura 3 muestra diferentes vórtices ópticos perfectos obtenidos para los valores enteros desde  $m=0$  hasta  $m=5$ . En la primera fila de esta figura se aprecia como los VOPs mantienen a simple vista su radio y ancho promedio. No obstante, si son trazados cortes transversales a las intensidades de los VOPs como se muestra en la parte derecha de la figura 4, entonces puede observarse que en realidad aparecen pequeñas diferencias en centésimas de milímetro que no superan los 10 píxeles entre los diámetros de los anillos para los VOP con las cargas topológicas

$m = 1, 2, 3, 5$  y  $m = 10$ , es decir los VOP son en realidad cuasi perfectos [34]. Finalmente, en la segunda fila de las figuras 2 y 3, puede notarse que ambas distribuciones de intensidad de los campos electromagnéticos de los vórtices ópticos y vórtices ópticos perfectos respectivamente tienen los mismos valores de fase.

**Figura 4. Perfiles teóricos de intensidad a lo largo de los centros de los vórtices ópticos perfectos con carga topológica  $m=1, 2, 3, 5$  y  $m=10$  [34].**

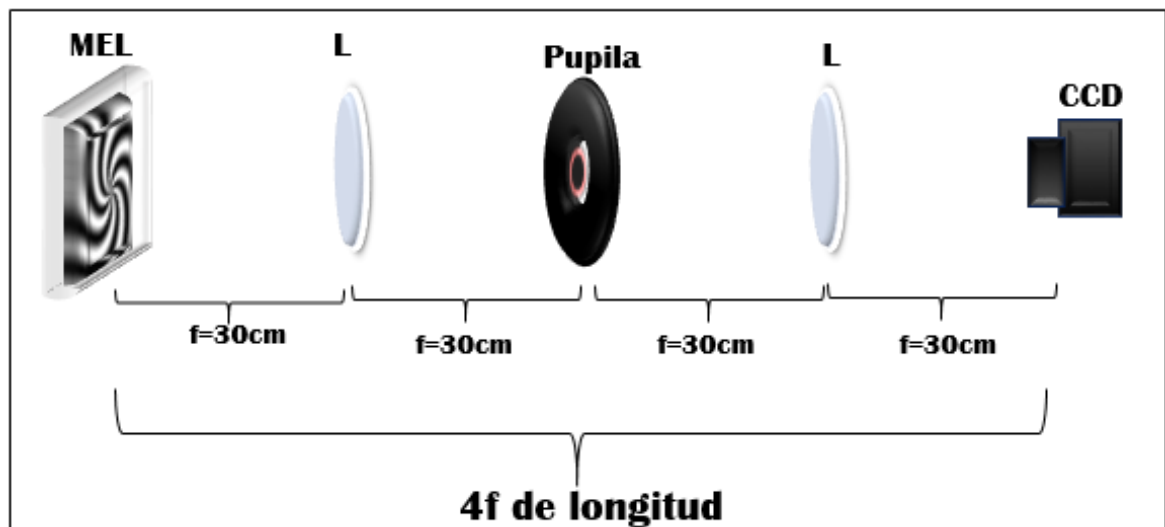


## 2.4 CORRELADOR 4-F

La casi invariancia en las dimensiones geométricas del frente de onda de un campo electromagnético de tipo perfecto y la ortogonalidad inherente que existe entre los estados MAO, hace a los VOPs útiles para las comunicaciones ópticas. En la *figura 5* se muestra el esquema de un sistema correlador típico 4F, en donde en el plano de entrada del sistema se encuentra colocado un modulador espacial de luz, en el cual se ha desplegado un holograma generado por computador para crear un VOP

o superposición de VOPs. De esta manera un VOP o superposición de VOPs con un dato codificado es generado por la transformación de Fourier de un haz Bessel-Gauss en el plano  $2f$  sobre la pupila a una distancia de 60 [cm] del modulador espacial. En este plano la función característica de la pupila es multiplicada por el VOP o superposición de VOPs, de manera que la transformación o convolución de los dos campos con el dato codificado es obtenida en la distancia  $2f$  a partir del plano de la pupila circular, segunda etapa del correlador. Al final la operación resultante en el plano de la cámara CCD que funciona como detector cuadrático, es equivalente al módulo al cuadrado de la correlación entre el campo Bessel-Gauss y la transformada de Fourier de la función característica de la pupila.

**Figura 5. Esquema del sistema correlador optoelectrónico  $4f$  para codificar y decodificar datos sobre la superposición de VOPs dinámicamente. MEL: Modulador espacial de luz; L: Lente de Fourier; P: Pupila; apertura circular y CCD, cámara CMOS.**



### 3. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL MONTAJE EXPERIMENTAL

#### 3.1 HOLOGRAMAS COMPUTARIZADOS TIPO AXICÓN

Una de las técnicas más utilizadas para la generación de haces con momento angular orbital es utilizar máscaras holográficas, las cuales son desplegadas en un modulador espacial de luz trabajando en amplitud en el modo acoplado en intensidad. La ventaja de utilizar un modulador espacial de luz para generar VOPs con respecto a los demás métodos, es que el modulador espacial de luz posee versatilidad en la dinámica de manipulación y asignación de cambios in situ [36].

Los hologramas generados por computador tipo axicón pueden ser generados utilizando la interferencia entre una onda plana de referencia de la forma  $\exp(ikz)$  y una onda con el VOP junto con una modulación radial que es de la forma  $\exp(im\theta + i\alpha r)$ , de manera que el patrón interferométrico entre las ondas mencionadas anteriormente está dado de la forma,

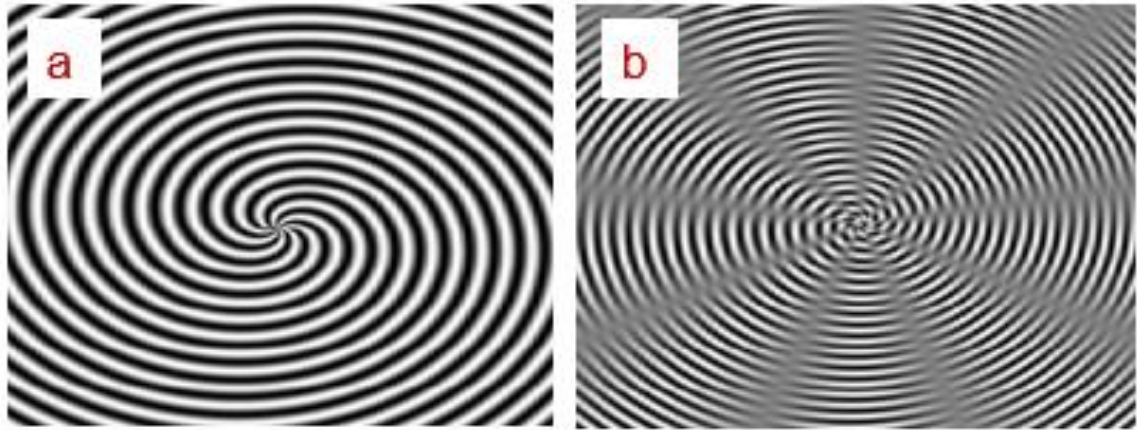
$$I = 2 + 2 \cos(kz - \alpha r - m\theta). \quad (2)$$

Donde  $\alpha$  es el parámetro de axicón y está definido como  $\alpha = k \arctan\left(\frac{k_r}{k_z}\right) \cong k \arcsin\left(\frac{k_r}{k}\right)$ ;  $k_r = \sqrt{k^2 - k_z^2}$ , es el número de onda radial,  $k$  es el número de onda total,  $k_z$  el número de onda longitudinal y  $m$  el valor de carga topológica [34].

En la *figura 6* se muestran dos hologramas utilizados para generar VOPs, el holograma de la parte izquierda es la representación de la carga topológica  $m=9$ , mientras que el holograma de la parte derecha representa la superposición de dos cargas topológicas en este caso  $m = 1$  junto a  $m = -9$ . Este último holograma será posteriormente utilizado para la codificación de una letra del alfabeto de

comunicación. En el anexo B se muestra el código numérico implementado en Matlab 2017a© para la generación de hologramas tipo axicón de 1024(H)x768(V).

**Figura 6. Hologramas computarizados para valores de carga topológicas: a)  $m = 9$ , b) superposición entre dos cargas topológicas,  $m=1$  con  $m=-9$ ;**

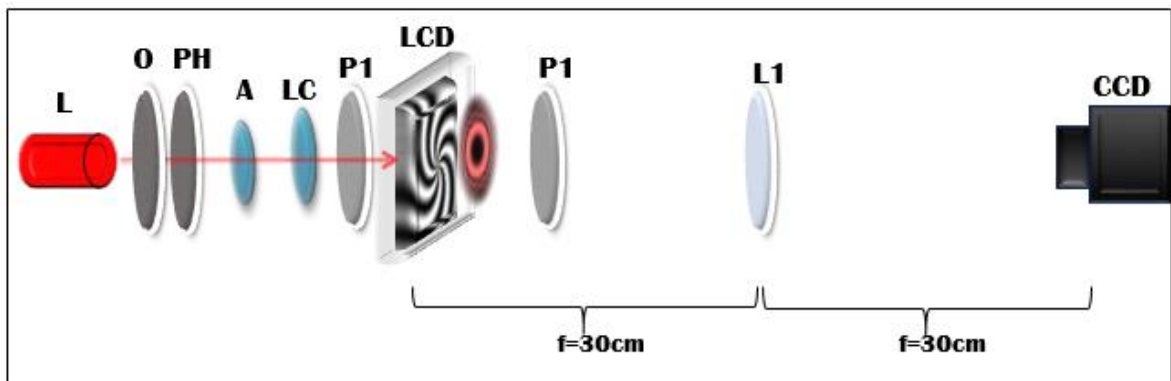


### 3.2 GENERACIÓN DE VÓRTICES ÓPTICOS PERFECTOS

La *figura 7* muestra el montaje utilizado para generar experimentalmente un vórtice óptico perfecto. Un láser (L) He-Ne con longitud de onda 632.8 [nm] es utilizado como fuente monocromática (algunas características principales del Laser se pueden observar en la tabla 1 del anexo A). El haz láser es filtrado espacialmente utilizando un objetivo (O) de microscopio de 0.40X junto con un pinhole (PH) de 20 [μm] de diámetro, tanto el objetivo como el pinhole son los encargados de remover las fluctuaciones aleatorias de mayor frecuencia del haz luminoso emergente del láser, es decir del ruido espacial, el sistema objetivo-pinhole es un filtro pasa bajas frecuencias. Luego el haz láser es colimado dejando todos los puntos del frente de onda luminosa con la misma fase usando una lente colimadora (LC) de 17 [mm] de distancia focal. La elección de esta lente fue realizada teniendo en cuenta la forma de iluminar completamente el área activa de la matriz de cristal líquido TN-LCD.

Dicha matriz de cristal líquido (LCD) se ubica en medio de los dos polarizadores (P1), en la tabla 2 del anexo A se muestran las características y especificaciones de la matriz. Finalmente, se hace converger el haz luminoso a la distancia focal imagen de la lente de Fourier (L1) sobre el eje óptico con el fin de grabar los vórtices ópticos perfectos en la cámara CMOS, E0-1312C. Las especificaciones acerca del funcionamiento y características de este dispositivo se muestran en la tabla 5 del anexo A.

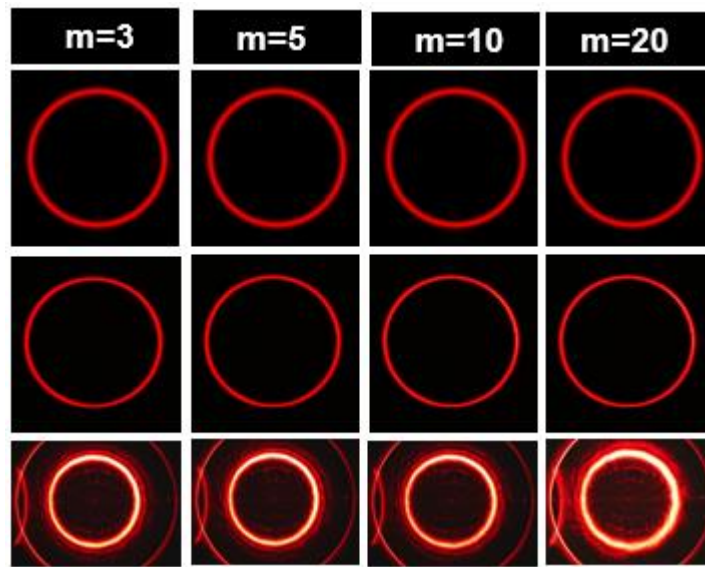
**Figura 7. Montaje experimental utilizado para la generación y observación de vórtices ópticos perfectos. L, laser; O, objetivo de microscopio; PH, Pinhole; A, abertura; LC, lente colimadora; P1, polarizador; LCD, dispositivo de cristal líquido; L1, Lente de Fourier; CCD, cámara CMOS.**



Una vez analizado teóricamente e implementado experimentalmente el montaje descrito anteriormente, en la tercera fila de la figura 8 se muestran los resultados experimentales de los VOPs generados utilizando el esquema experimental. La fila 2 de la misma figura permite apreciar los VOPs generados numéricamente a través de un algoritmo creado en Matlab 2017a™ y en la fila 4 se muestran VOPs obtenidos en trabajos anteriores [34], y que han sido puestos allí para poder apreciar la mejora en la obtención de estos VOPs a partir de la caracterización en el modo acoplado en intensidad [9-10] y fase pura [20-21] de la matriz de cristal líquido utilizada en el

presente trabajo. En las imágenes experimentales de intensidad para los VOPs mostradas en la tercera fila de la figura 8, se aprecia la correspondencia entre las simulaciones teóricas (segunda fila) junto con las obtenido experimentalmente, en la relación de invariancia del diámetro del VOP respecto al valor de la carga topológica entera presente en cada uno de los haces con MAO.

**Figura 8. Vórtices ópticos perfectos teóricos (segunda fila) y experimentales (tercera fila y cuarta fila), para cargas topológicas con valores de  $m=1$ , 5, 10 y  $m=20$  respectivamente.**

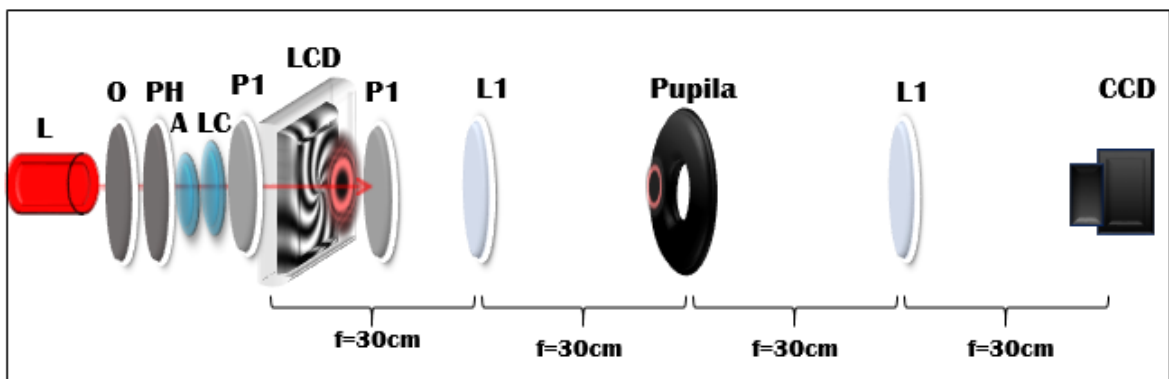


### 3.3 CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN DEL MONTAJE EXPERIMENTAL DEL SISTEMA 4F

En la *figura 9*, se muestra el montaje utilizado para codificar y decodificar datos utilizando un sistema optoelectrónico  $4f$ . La primera etapa  $2f$  es utilizada para generar y codificar datos utilizando los VOPs descritos en la figura 7. Por otra parte, la segunda etapa  $2f$ , medida desde el plano de la abertura circular es utilizado para transmitir y decodificar los datos en el plano de la cámara CMOS en donde se

obtiene la correlación entre la función ubicada en la LCD y la transformada de Fourier de la función de transmisión de la pupila.

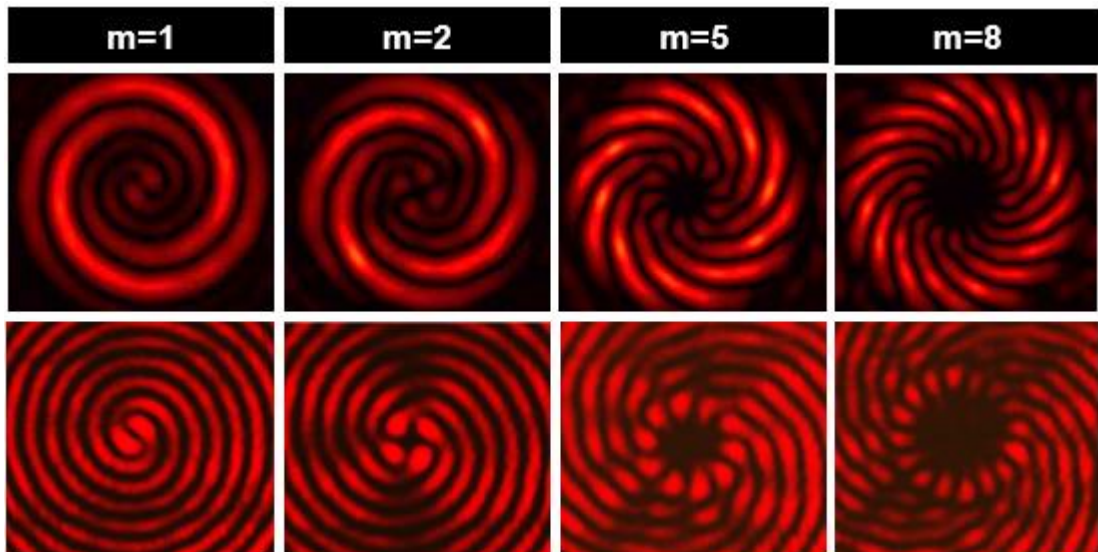
**Figura 9. Montaje experimental para la codificación de un vórtice óptico perfecto a través de un correlador 4f. L, laser; O, objetivo de microscopio; PH, Pinhole; A, abertura; LC, lente colimadora; P1, polarizador; LCD, dispositivo de cristal líquido; L1, Lente de Fourier; Pupila, Abertura circular; CCD, cámara CMOS.**



#### 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

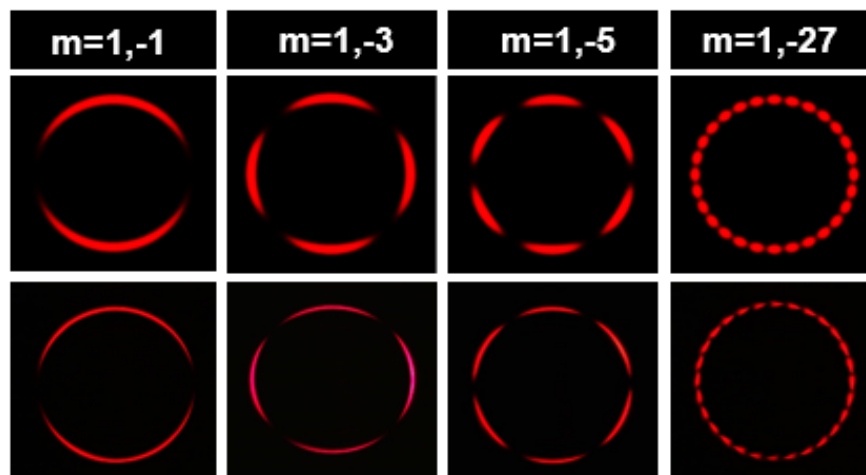
La figura 10 muestra la comparación entre los resultados teóricos (parte superior) junto a los resultados obtenidos experimentalmente (parte inferior) para distintos valores de carga topológica en el plano de la cámara CMOS, sobre el plano de salida del correlador  $4f$ . En las imágenes de difracción de la figura 10 mostradas en la tercera fila obtenidas experimentalmente se puede apreciar la correspondencia con la forma de red de espiral obtenidas de forma analítica para iguales valores de carga topológica presente en el VOP mostradas en la segunda fila. De estos resultados se puede inferir que el conteo de la cantidad de espirales resulta siendo igual a 2 veces el valor de carga topológica que se está analizando.

**Figura 10. Resultados teóricos (segunda fila) y experimentales (tercera fila) del patrón de difracción entre una onda con el VOP y una onda plana a través del sistema correlador óptico  $4f$  para cargas topológicas de valor  $m=1, 2, 5$  y  $m=8$ .**



Por otra parte, la figura 11 muestra los resultados de la superposición de VOPs utilizando dos cargas topológicas a enviar en un solo holograma generado por computador. En estos resultados se ha tomado carga topológica fija el valor de  $m=1$ , junto con otro valor de carga topológica variable de valor negativo que para codificar el abecedario podrían ser utilizados los valores que van desde  $m=-1$  hasta  $m=-27$  mostrados en la tabla 2. Los VOPs generados por esta superposición se muestran en la figura 11, en donde se puede apreciar la correspondencia entre los resultados obtenidos teóricamente junto a los resultados experimentalmente, en las filas 2 y 3, respectivamente.

**Figura 11. Superposición de vórtices ópticos perfectos teóricos (segunda fila) y experimentales (tercera fila) resultantes de la superposición para cargas topológicas  $m=1$  como carga fija y una segunda carga topológica variable de valor  $m=-1,-3,-5$  y  $m=-27$  capturados en el plano de salida del correlador 4f.**

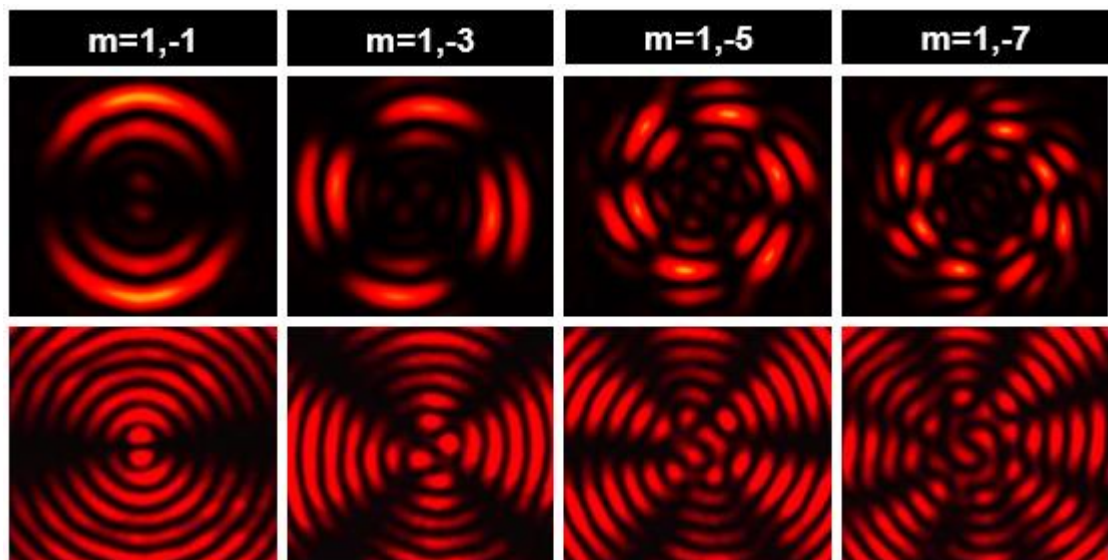


Con el objetivo de codificar y decodificar un abecedario teniendo en cuenta los VOP y la superposición de VOPs, es posible apreciar de la figura 11 que con la superposición de VOPs se generan zonas claras y oscuras bien definidas cuyo número es igual a la suma de los valores absolutos de los valores de carga topológica utilizados. Además, que el tamaño del patrón de difracción de la

superposición de los VOPs permanece invariante a las cargas utilizadas en la superposición. Mientras que para el patrón de difracción de los VOPs genera espirales cuyas dimensiones geométricas cambian dependiendo del valor de carga topológica utilizada. De acuerdo con lo anterior se ha decidido utilizar la superposición de VOPs como codificador del abecedario.

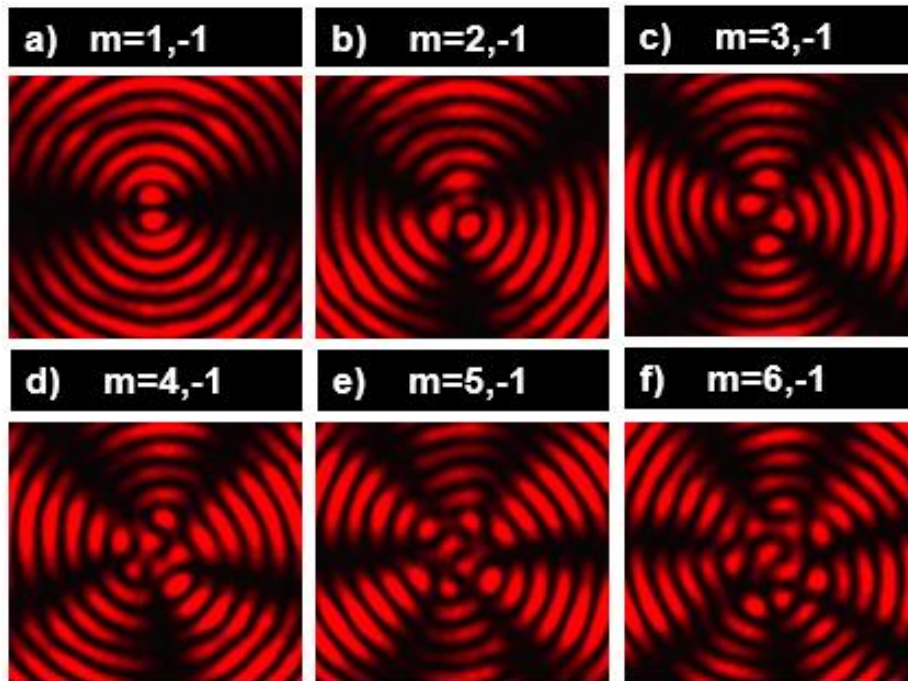
En la figura 12 se muestran los resultados teóricos (segunda fila) y experimentales (tercera fila) obtenidos a partir de la difracción de la superposición de VOPs. En las imágenes mostradas en la tercera fila de la figura 12 puede notarse la correspondencia con los resultados teóricos mostrados en la segunda fila, es decir que la suma de los valores absolutos de las cargas topológicas es igual al número de zonas oscuras angulares presentes en el patrón de difracción. Por tal razón, es posible utilizar este criterio para codificar el abecedario para transmitir y decodificar la información.

**Figura 12. Resultados teóricos (primera fila) y experimentales (segunda fila) de la propagación de las imágenes mostradas en la figura 11 para una carga topológica fija  $m=1$  y los valores de carga topológica negativa de  $m=-1,-3,-5$  y  $m=-7$  obtenidas en el plano de salida correlador 4f.**



No obstante, es posible usar otros valores de carga topológica fija distinta al valor de  $m=1$  como se observa en la figura 13. Como es posible apreciar en las imágenes de la figura 13, se encuentran los resultados experimentales de la difracción de un VOP fijo utilizando diferentes valores para la carga topológica. A partir de estos resultados se puede inferir que el conteo de la cantidad de espirales resulta siendo la suma de los valores absolutos de las cargas topológicas utilizadas. Para este sistema de codificación, se ha elegido el sistema en el cual el valor de carga topológica fija  $m=1$  es mantenido constante, debido a que los errores de detección explicados en la siguiente sección son menores para otros valores de carga topológica fija.

**Figura 13. Patrón de interferencia de un VOP generado a partir de la superposición de dos cargas topológicas utilizando distintos valores para la carga topológica fija tales como  $m=1, 2, 3, 4, 5$  y  $m=6$ , con valores para la carga variable de  $m=-1$  obtenidas en el plano de salida del correlador  $4f$ .**



## 4.1 PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES

Figura 14. Etapas del procesamiento digital de imágenes.



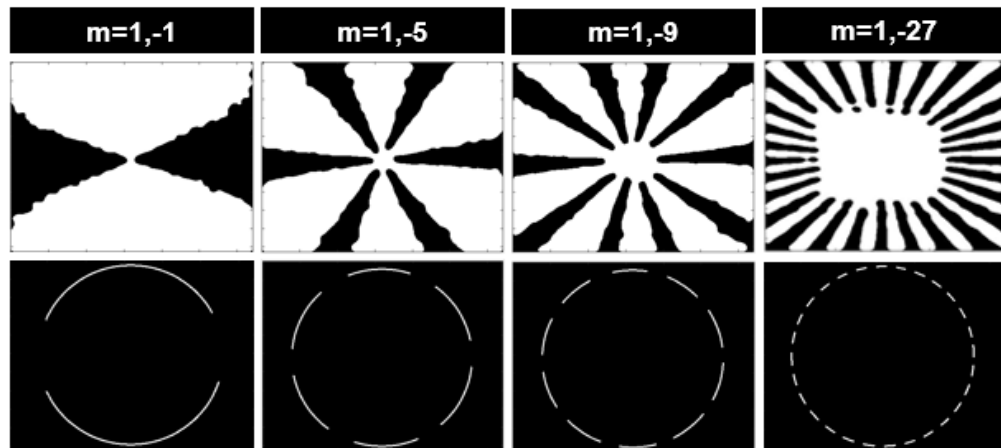
Con el propósito de implementar un sistema de decodificación dinámico a la salida del sistema  $4f$  se ha utilizado el procesamiento digital de imágenes de Matlab 2017a™. En la figura 14 se muestra el diagrama de flujo del conjunto de técnicas aplicadas a las imágenes digitales adquiridas con la cámara CMOS, las cuales se utilizaron para mejorar la calidad de la imagen y facilitar la búsqueda de información contenida en ellas. Para llevar a cabo lo anterior, la imagen adquirida en el sistema  $4f$  es binarizada usando un umbral de nivel de gris que depende de las condiciones de iluminación en donde fueron realizados los experimentos. De manera que los valores que superen dicho umbral adoptan el valor de 1, de lo contrario se les asigna el valor de 0. Luego de realizar varios análisis con el método de prueba y error se lograron determinar distintos niveles de iluminación para el código de Matlab™ dependiendo del valor de la iluminación en el laboratorio.

Tabla 1. Condiciones de iluminación del laboratorio en donde se realizaron los experimentos (parte izquierda) y su respectivo umbral de binarización (parte derecha).

Condiciones de iluminación	Umbral de binarización
Luces apagadas	0.056
Solo luz trasera encendida	0.3
Solo luz delantera encendida	0.45
Luces encendidas	0.46



**Figura 16. Procesamiento digital de imágenes. Imágenes binarizadas (segunda fila) e imágenes filtradas (tercera fila) para valores de carga topológica fija de  $m=1$  y cargas topológicas variables de  $m=-1,-5,-9$  y  $m=-27$ .**



De acuerdo con lo anterior es posible probar experimentalmente que escoger un radio lo suficientemente grande en el filtro de procesamiento de las imágenes, evita las malformaciones, consideradas ruido, generadas al centro de las aspas ya que a medida que aumenta el valor de carga topológica, la mancha blanca, zona central, generada por la dilatación de las imágenes mostradas en la parte superior de la figura 16 también aumenta. En el anexo D se encuentra el algoritmo de procesamiento digital de imágenes que se utilizó para decodificar el estado de superposición de VOPs.

#### **4.2 RESULTADOS OBTENIDOS EN LA DETECCIÓN DEL ESTADO DE SUPERPOSICIÓN DE VOPS**

Para realizar las pruebas que permitan demostrar la eficiencia del sistema y calcular el error en la detección de la superposición de valores de cargas topológicas con la mejor condición de iluminación seleccionada, se determinó un rango de radio mínimo del filtro circular para la detección de cargas topológicas de 470 píxeles a 480 píxeles para el radio interno y externo, respectivamente; y un rango de radio

máximo de 500 a 510 píxeles en el radio interno y externo, también respectivamente, para el filtro circular de procesamiento de toma de las muestras. En el rango mencionado anteriormente se escogieron 7 radios con una diferencia de 5 píxeles entre cada uno de ellos. Se analizaron valores de cargas topológicas desde -1 hasta -31 realizando 10 pruebas por radio en todas las cargas para un total de 2170 pruebas realizadas.

Las figuras 17, 18 y 19, muestran los resultados obtenidos en la detección de cargas topológicas, allí se puede observar que de las 2170 pruebas realizadas fueron detectados satisfactoriamente el 98% de las cargas topológicas recibidas y que el 2% restante pertenece al porcentaje de error obtenido en estas pruebas (aquí, se mide el error cuando se envía por el canal de comunicación una carga topológica conocida). La figura 18, muestra una gráfica detallada del porcentaje de error mencionado anteriormente en donde se dan a conocer específicamente en que porcentajes se encuentra representado el resultado total del error distribuido en los siete radios que fueron escogidos para realizar estas pruebas y finalmente en la figura 19 se muestra como estuvieron distribuidos los porcentajes con respecto al tipo de error que se presentaron en los análisis realizados de los cuales es posible inferir, que el error con mayor ocurrencia es el de falso rechazo ocupando un 67% mientras que los de tipo falsa aceptación ocupan el 33% restante del total de los errores presentados en las pruebas realizadas experimentalmente.

Figura 17. Porcentaje de efectividad y error en la detección de cargas topológicas.

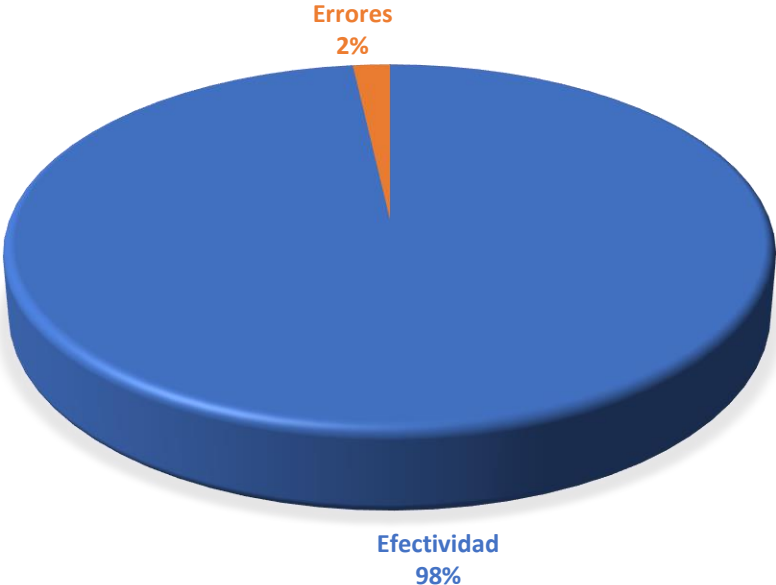
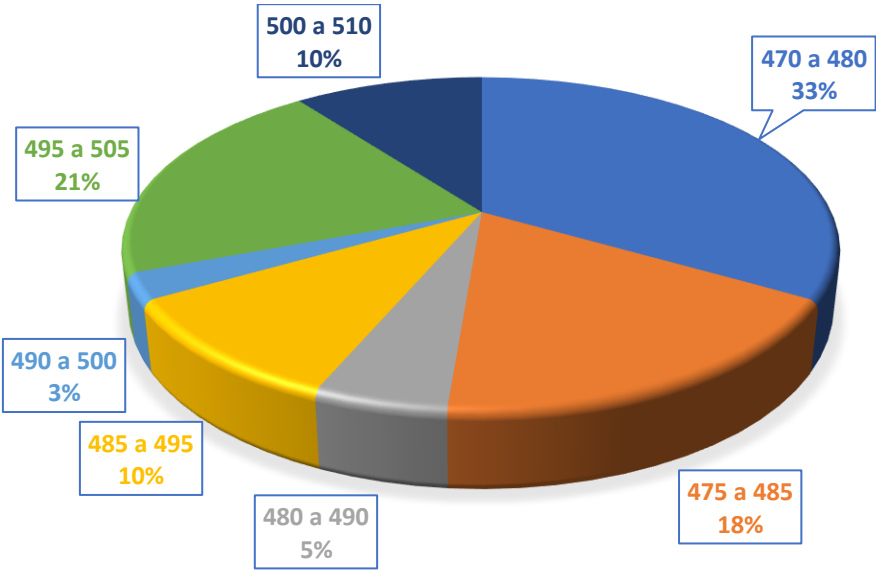
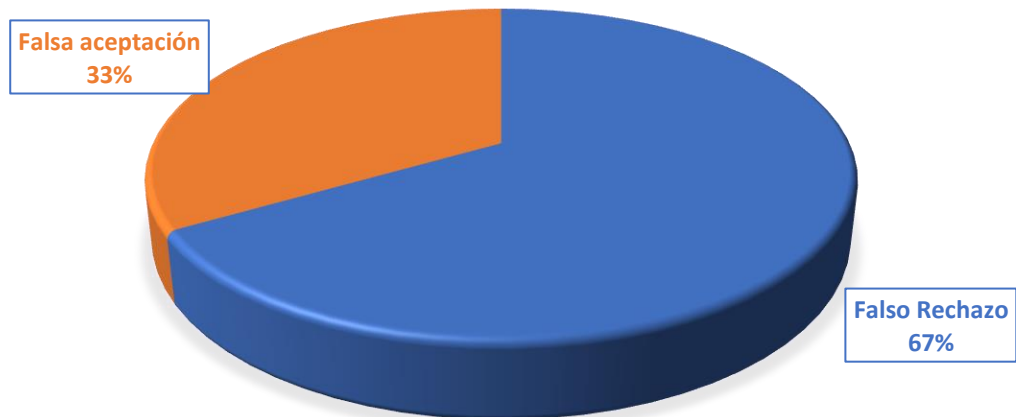


Figura 18. Porcentaje de error en detección de carga topológica para cada uno de los radios medidos en píxeles del filtro circular.



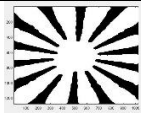
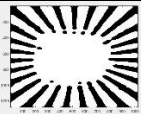
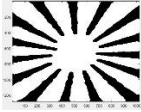

**Figura 19. Resultados obtenidos para los dos tipos de errores presentados en la verificación de carga topológica.**



A partir de los resultados mostrados en la figura 18 se ha elegido el radio con menor porcentaje de error para decodificación de estados de superposición de haces con MAO, cuyo valor es de 490 a 500 píxeles en los respectivos radios del filtro espacial circular, debido a que el porcentaje de error que presenta este radio ocupa el 3% dentro del porcentaje total de error mostrado en la figura 17, es del tipo falso rechazo. Finalmente, ha sido codificado el alfabeto español en las 28 letras y un espacio para separar palabras cuando se envía información (véase la tabla 2).

Tabla 2. Asignación del alfabeto sobre los vórtices ópticos perfectos con momento angular orbital.

Alfabeto asignado	Carga procesada	Carga detectada	Alfabeto asignado	Carga procesada	Carga detectada
<b>Espacio</b>		1	<b>N</b>		15
<b>A</b>		2	<b>Ñ</b>		28
<b>B</b>		3	<b>O</b>		16
<b>C</b>		4	<b>P</b>		17
<b>D</b>		5	<b>Q</b>		18
<b>E</b>		6	<b>R</b>		19
<b>F</b>		7	<b>S</b>		20
<b>G</b>		8	<b>T</b>		21
<b>H</b>		9	<b>U</b>		22
<b>I</b>		10	<b>V</b>		23
<b>J</b>		11	<b>W</b>		24
<b>K</b>		12	<b>X</b>		25

<b>L</b>		<b>13</b>	<b>Y</b>		<b>26</b>
<b>M</b>		<b>14</b>	<b>Z</b>		<b>27</b>

Como ejemplo se anexa un CD al libro en donde se encuentra el video realizado de una prueba de funcionamiento del sistema optoelectrónico de codificación de información basado en VOPs con momento angular orbital, en donde se muestra una pantalla dividida en dos partes, en las cuales representan cada uno de los equipos de cómputo utilizados tanto para el envío y codificación (computador #1) como para recibir y decodificar (computador #2). Las especificaciones de los equipos anteriormente mencionados se encuentran en la tabla 6 del anexo A. En el video la frase codificada fue “UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER”.

## 5. CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados presentados en las anteriores secciones del presente trabajo de investigación, las conclusiones pueden escribirse como:

- A partir de la calibración previa de la matriz de líquido utilizada en el presente trabajo en el modo acoplado en intensidad [9-10] y extendida al modo puro de fase [20-21]; se demostró experimentalmente que los resultados obtenidos en este trabajo de investigación para la generación de vórtices ópticos perfectos son mejores en intensidad que los obtenidos sin la caracterización previa de la matriz.
- Se generaron superposiciones experimentales de VOPs con valores bien definidos de carga topológica y se corroboró su patrón de intensidad numérico.
- Se mostró que es posible codificar datos utilizando como prototipo nuevo la superposición de dos vórtices ópticos perfectos con cargas topológicas, fija  $m_1=1$  y variante  $m_2$  desde -1 hasta -31 en un sistema  $4f$  en el espacio libre. Además, que el error asociado a la decodificación de datos tiene un valor del 2% para la detección de una letra. Dentro del porcentaje de error, el 63% del total del error es de tipo falso rechazo y restante 33% es de tipo falsa aceptación. Lo anterior se constituye en una novedad del presente trabajo de investigación ya que hasta el momento los trabajos anteriores sólo utilizan vórtices ópticos u ondas EM con MAO que difractan fuertemente en la transmisión de los datos codificados [25,49-50].

## 6. PERSPECTIVAS

De acuerdo a los resultados de codificación y decodificación de información en serie de datos usando vórtices ópticos perfectos, es posible señalar que el presente trabajo de investigación es base para la codificación y decodificación de datos en paralelo utilizando la matriz de cristal líquido por regiones para generación de superposición de VOPs y algunos sensores de potencia para la detección. De esta manera el volumen de información transmitida se podría incrementar. Adicionalmente el presente trabajo de investigación permite suponer una extensión de una base binaria a una base de n-bits y podría permitir futuras aplicaciones en mediciones en el campo de la medicina.

Además, como la propiedad espacial de las ondas electromagnéticas con MAO ofrece potenciales aplicaciones, se podría incluir como electiva la materia OPTOELECTRÓNICA en el plan de estudios del programa académico de ingeniería electrónica.

## 7. PRODUCTOS ASOCIADOS

Actualmente se trabaja en la preparación de un artículo de investigación con los resultados del presente trabajo para la base de datos *IEEE*.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1]. A. Ambuj, R. Vyas, and S. Singh. Diffraction of orbital angular momentum carrying optical beams by a circular aperture. *Optics Letters*, vol. 39 no. 19, pp. 5475-5478 (2014).
- [2]. A. D'Errico, R. D'Amelio, B. Piccirillo, F. Cardano, and L. Marrucci. Measuring the complex orbital angular momentum spectrum and spatial mode decomposition of structured light beams. *Optica* vol.4 no. 11, pp. 1350-1357 (2017).
- [3]. A. Gatto, M. Tacca, P. Martelli, P. Bo and M. Martinelli. Free-space orbital angular momentum division multiplexing with Bessel beams. *Journal of Optics*, vol. 13 no. 064018, 5pp. (2011).
- [4]. A. Nesterov, V. Niziev and V. Yakunin. Generation of high-power radially polarized beam. *Applied Optics*, vol. 32 no.22, pp. 2871-2879 (1999).
- [5]. A. S. Ostrovsky, C. Rickenstorff-Parrao, and V. Arrizón. Generation of the "perfect" optical vortex using a liquid-crystal spatial light modulator. *Optics Letters*, nol. 38, no. 4, pp. 534-536, (2013).
- [6]. A.T. O'Neil, I. MacVicar, L. Allen and M.J. Padgett. Intrinsic and extrinsic nature of the orbital angular momentum. *Physical Review Letters*, vol.88, no. 5, pp. 053601 (1) – 053601 (4) (2002).
- [7]. C. Brunet, V. Pravin, M. Younès, S. LaRochelle, and L. A. Rusch. Design, fabrication and validation of an OAM fiber supporting 36 states. *Opt. Express*, vol. 22, no. 21, pp. 26117-26127 (2014).

- [8]. C. H. Acevedo Cáceres. Análisis Teórico-Experimental de un haz con Momento Angular Orbital entero y no entero. Tesis de maestría en física, Bucaramanga, Universidad Industrial De Santander, 116 pp. (2012).
- [9]. C. J. Cuevas Cely et al. Global characterization of nematic liquid crystal display Sony LCX038ARA with applied electric field in the modulation amplitude-coupled regime. *J. Phys.: Conf. Ser.* Vol. 850 012011 (2017).
- [10]. C. J. Cuevas Cely. Caracterización global de la modulación en el régimen acoplado en amplitud de una matriz de cristal líquido por transmisión mediante el modelo retardador-rotor. Universidad Industrial De Santander, Bucaramanga, 110 pp. (2016).
- [11]. C. Kai, P. Huang, F. Shen, H. Zhou and Z. Guo. Orbital Angular Momentum Shift Keying Based Optical Communication System. *IEEE Photonics Journal*, vol. 9, no. 2, pp. 1-10 (2017).
- [12]. G. Gibson, J. Courtial, M. Padgett, M. Vasnetsov, S. Barnett and S. Franke-Arnold. Free-space information transfer using light beams carrying orbital angular momentum. *Optics Express*, vol. 12 no. 22, pp. 5448-5455 (2004).
- [13]. G. Molina-Terriza, J. P Torres, L. Torner. Management of the angular momentum of light: preparation of photons in multidimensional vector states of angular momentum. *Physical review letters*, vol. 88 no. 1, pp. 013601 (2001).
- [14]. I. Djordjevic and M. Arabaci. LPDC-Coded orbital angular momentum (OAM) modulation for free-space optical communication. *Optics Express*, vol. 18 no. 24, pp. 24722-24728 (2010).

- [15]. I.S. Gradshteyn, I.M. Ryzhik. Table of integrals, series and products. pp 707;714. Seventh edition, Elsevier Inc., (2007).
- [16]. J. A. Anguita, J. Herreros & I. B. Djordjevic. Coherent Multimode OAM Superpositions for Multidimensional Modulation. *IEEE Photonics society*, vol. 6, no. 2, pp. 1-11, (2014).
- [17]. J. B. Götte, K. O'Holleran, D. Preece, F. Flossmann, S. Franke-Arnold, S. M. Barnett, and M. J. Padgett. Light beams with fractional orbital angular momentum and their vortex structure. *Optics Express*, vol. 16, no. 2, pp 993-1006, (2008).
- [18]. J. F. Nye and M. V. Berry. Dislocations in wave trains. *Proceedings Royal Society London Serie A*. 336 165–90, (1974).
- [19]. J. H. Kang et al. Low-power nano-optical vortex trapping via plasmonic diabolito nanoantennas. *Nature Communications*, vol. 2, no. 582, 6pp. (2011).
- [20]. J. J. Salamanca Vela et al. Azimuthal polarization states for the optimization of a liquid crystal display Sony LCX038ARA in the pure-phase regime. *J. Phys.: Conf. Ser.* Vol. 935 012048 (2017).
- [21]. J. J. Salamanca Vela. Caracterización global de la modulación en fase pura de una matriz de cristal líquido por transmisión mediante el modelo retardador-rotor. Universidad Industrial De Santander, Bucaramanga, 83 pp. (2017).
- [22]. J. Masajada, I. Augustyniak, B. Sokolenko, A. Khoroshun, A. Popiołek-Masajada, and M. Bacia, Optical Vortex Scanning in an aperture limited system. *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 55, pp. 105–112 (2014).

- [23]. J. Maxwell. On physical lines of force part I. *Philosophical Magazine and Journal of Science*, Series Fourth, vol 21, no. 139, pp. 161-175 (1861).
- [24]. J. Poynting. The wave motion of a revolving shaft, and a suggestion as to the angular momentum in beam circularly polarised light. *Proceedings Royal Society London Serie A*, vol. 82, pp. 560-567 (1909).
- [25]. J. Wang and A. E. Willner. Using orbital angular momentum modes for optical transmission. *Optical Fiber Communications Conference and Exhibition*, San Francisco, CA, pp. 1-3, (2014).
- [26]. J. Wang. Advances in communications using optical vortices. *Photonics Research*, vol. 4, no. 5, pp. B14-B28 (2016).
- [27]. J. Wang et al. Terabit free-space data transmission employing orbital angular momentum multiplexing. *Nature Photonics*, vol. 6, pp. 488–496 (2012).
- [28]. J. Y. S. Tan and K. Yu. Asymmetric Superimposed Optical Vortex Beam Emission at Exceptional Point. *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 29, no. 10, pp. 818-821 (2017).
- [29]. K. Crabtree, J. A. Davis, and I. Moreno. Optical processing with vortex-producing lenses. *Applied Optics*, vol. 43, no. 6, pp. 1360-1367 (2004).
- [30]. L. Allen, M. Beijersbergen, R. 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, pp. 8185–8189 (1992).
- [31]. M. J. Padgett. Light in a twist: optical angular momentum., Vol. 8637, pp. 863702-863710 (2013).

- [32]. M. K. Kim. Applications of Digital Holography in Biomedical Microscopy. *Journal of the Optical Society of Korea*, vol. 14, no 2, pp 77-89 (2010).
- [33]. M. S. Soskin, V. N. Gorshkov, V. Vasnetsov, J. T. Malos and N R Heckenberg. Topological charge and angular momentum of light beams carrying optical vortices. *Physical Review A*, vol. 56, no. 5, pp 4064–75, (1997).
- [34]. N. Anaya. C., C. H. Acevedo, and Y. Torres. M. Generation of Perfect Optical Vortices by Using a Transmission Liquid Crystal Spatial Light Modulator. *International Journal of Optics*, vol. 2017, Article ID 6852019, 10 pages, 2017.
- [35]. N. Bozinovic et al. Terabit-scale orbital angular momentum mode division multiplexing in fibers. *Science* vol. 340, no. 6140, pp. 1545–1548 (2013).
- [36]. N. Matsumoto, T. Ando, T. Inoue, Y. Ohtake, N. Fukuchi, and T. Hara. Generation of high-quality higher-order Laguerre-Gaussian beams using liquid-crystal-on-silicon spatial light modulators. *Journal Optics Society of America A*, vol. 25, no.7, pp. 1642-1651 (2008).
- [37]. N. R. Heckenberg, R. McDuff, C. P. Smith, H. Rubinsztein, D. Dunlop, and M. J. Wegener. Laser beams with phase singularities. *Opt. Quantum Electron.* Vol 24, S951-S962, (1992).
- [38]. R. A. Beth. Mechanical Detection and Measurement of the Angular Momentum of Light. *Physical Review*, vol. 50, no.2 pp. 115-125 (1936).
- [39]. R. G. Sangeetha, V. Chandra and D. Chadha, Optical Interconnection Bidirectional Data Vortex Network: Architecture and Performance Analysis, *Journal of Lightwave Technology*, vol.31, no. 8, pp. 1283- 1294 (2013).

- [40]. R. Kelner and J. Rosen. Methods of single-channel digital holography for three-dimensional imaging. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 12, no. 1, pp. 220-230 (2016).
- [41]. R. M. Nejad, et al., Mode Division Multiplexing Using Orbital Angular Momentum Modes Over 1.4-km Ring Core Fiber. *Journal of Lightwave Technology*, Vol.34, no 18, pp. 4252-4258 (2016).
- [42]. S. Fu, S. Zhang, T. Wang, and C. Gao. Measurement of orbital angular momentum spectra of multiplexing optical vortices. *Optics Express*, vol 24, no. 6, pp. 6240-6248 (2016).
- [43]. S. H. Jeon and S. K. Gil. Proposal for Optical One-time Password Authentication Using Digital Holography. *Journal Optics Society of Korea*, vol. 20, no. 6, pp. 722-732 (2016).
- [44]. T. Ehmke, T. Heiko, A. Knebl, and A. Heisterkamp. Molecular orientation sensitive second harmonic microscopy by radially and azimuthally polarized light. *Biomedical Optics Express*, vol. 5 no. 7, pp. 2231-2246 (2014).
- [45]. T. Kreis. 3-D Display by Referenceless Phase Holography. *IEEE Transactions on industrial Informatics*, vol. 12, no. 2, pp. 685-693 (2016).
- [46]. V. Yu. Bazhenov, M.V. Vasnetsov and M.S. Soskin. Laser Beams with Screw Dislocations in their Wavefronts. *JETP Letters*, vol. 52, no. 8, pp 1037-1039, (1990).
- [47]. W. Qiao, T. Lei, Z. Wu, S. Gao, Z. Li, and X. Yuan. Approach to multiplexing fiber communication with cylindrical vector beams. *Optics Letter*, vol. 42, no.13, pp. 2579-2582 (2017).

[48]. Y. Li, W. Li, K. Miller and E. Johnson. Multiplexing and Amplification of 2-  $\mu\text{m}$  Vortex Beams With a Ho:YAG Rod Amplifier, *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 28 no. 19, pp. 2031 - 2034 (2016 ).

[49]. Y. Yan et al., High-capacity millimetre-wave communications with orbital angular momentum multiplexing. *Nature Communications*, vol. 5, p. 4876 (2014).

[50]. Z. Wang, N. Zhang, and X.-C. Yuan. High-volume optical vortex multiplexing and de-multiplexing for free-space optical communication. *Optics Express*, vol. 19 no. 2, pp. 482-492 (2011).

## ANEXOS

### ANEXO A. DISPOSITIVOS Y SOFTWARE UTILIZADOS

Tabla 3. Especificaciones técnicas del láser He Ne.

<b>Láser Helio – Neón Research Electro optics, Inc.</b>	
Número del modelo	R-30990
Modo longitudinal	441 MHz
Dimensiones	425.5 x Ø44.5 mm
Longitud de Onda	632.8 nm
Diámetro del haz	0.80 mm
Potencia de salida	5.0 mW
Polarización	Aleatoria
Modo espacial	$TEM_{00}$
Divergencia del haz	1.01 mrad
Ruido	1.0%
Requerimientos de energía	120/240 VAC, 50/60 Hz
Tamaño de la fuente de alimentación	104.8 x 38.1 x 165.1 mm

Tabla 4. Especificaciones de la matriz de cristal líquido TN-LCD SONY LCX038ARA.

<b>Características de la TN-LCD SONY LCX038ARA</b>	
Resolución espacial	1024(H) x 768(V) pixeles
Paso de píxel H x V	36 x 36 [ $\mu\text{m}$ ]
Dimensión del píxel H x V	33 x 25 [ $\mu\text{m}$ ] píxeles rectangulares
Dimensión del panel H x V	36.9 x 27.6 [mm]
Transmisión	21 % típica de 600 [nm]
Factor de llenado	64% con máscara metálica opaca entre pixeles
Razón de contraste	>100:1 se puede lograr fácilmente en el eje
Cross talk	Max 5%

Tabla 5. Propiedades de la cámara CMOS EO-1312C.

<b>Características de la cámara CMOS</b>	
Número del modelo	EO-1312C
Pixeles [H x V]	1280 x 1024
Tamaño del pixel, H x V	5.3 x 5.3 [ $\mu\text{m}$ ]

Cuadros por segundo	25 [fps]
Salida de video	USB 2.0
Dimensiones	44 x 44 x 25.5 [mm]
Resolución	1.3 (Megapíxeles)

### Equipos de cómputo:

A continuación, se muestran las principales características de los computadores utilizados en la práctica.

Tabla 6. Especificaciones técnicas de los equipos de cómputo.

Parámetros	Características
<b>Equipo 1: Hologramas Generados por Computador</b>	
Marca	Dell
Sistema Operativo	Windows XP
Edición de Windows	Windows XP
Procesador	AMD Turion(tm) 64 x 2 Mobile Technology TI-64, 2.19 GHz.
Memoria instalada	3.37 GB
Tipo de sistema	Sistema operativo de 32 bits
Software de procesamiento	Matlab 2007 ©
Parámetros	Características
<b>Equipo 1: Cámara</b>	
Marca	Lenovo
Sistema Operativo	Windows 10
Edición de Windows	Windows 10 Pro
Procesador	Intel (R) Core(TM) i5-4200U CPU @ 1.60 GHz 2.30 GHz
Memoria instalada	8.00 GB (7.89 GB usable)
Tipo de sistema	Sistema operativo de 64 bits
Software de procesamiento	Matlab 2017a ©, uEye ActiveX Control

## ANEXO B. ALGORITMO DE CODIFICACIÓN DE INFORMACIÓN

```
clc;
clear all;
close all

periodo=4;
retardo=0.11;

%% codificación
prompt = 'Escriba el texto a enviar en MAYUSCULA \n\n';
str = input(prompt,'s');
text= double (str)-63;
for i=1:length(text)
    if text(i)== -31
        text(i)=1;
    else
        if text(i)==145
            text(i)=28;
        end
    end
end
muestras=length(text);
t =
timer('StartDelay',retardo,'Period',periodo,'TasksToExecute',muestras,'ExecutionMode','fixedRate','StopFcn','pause(2);close all;');
t.TimerFcn=@iol_52,text};
t.BusyMode='error';
start (t)

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

function iol_52(obj,event,text)
m=1; % tines
d=2; % divisor
k=2*pi/d;
a=(1.2e-4)/(14e-5); % axicon period in pixels 197357
kr=k/sqrt((a*a)+(d*d)); % radial vector component
x=linspace(-511,511,1024); % step in x
y=linspace(-384,384,768); % step in y
[X,Y]=meshgrid(x,y);
[Theta,r]=cart2pol(Y,X);

%% Desplegar hologramas
Fase=(2*pi.*X/d)-(a.*r)-m.*Theta;
I=(2+2*cos(Fase))/1;
Fase1=(2*pi.*X/d)-(a.*r)+text(obj.TasksExecuted).*Theta;
I1=(2+2*cos(Fase1))/1;
It=I+I1;

%% visual-Screen
pf=figure(1);
```

```

set(pf, 'menu', 'none', 'toolbar', 'none', 'Numbertitle', 'off', 'Position', [1 1
1024 742]);
imagesc(x,y,It); colormap (gray); axis('off');
pa=gca;
rect=get(pa, 'position');
set(pa, 'position', [0, 0, 1, 1]);
end

```

## ANEXO C. ALGORITMO DE ADQUISICIÓN DE IMÁGENES

```

clc
close all
clear all

periodo=1;
expl=56.390;

h=actxcontrol('UEYECAM.uEyeCamCtrl.1', 'position', [0,0,561,430]);
% h.methods('-full');
h.InitCamera(1); %Camera near: #1. Camera far: #2
h.SetPixelClock(30); %30
h.SetFrameRate(17.45); %17.45
h.SetExposureTime(expl); %ExposureTime. Camera near: 0.6 - Camera
far: 0.32 - Camera far 151Cms: 0.4

image=h.StopLiveVideo(1); %Detenemos la cámara
Width=h.GetImageWidth; %Ancho de la Imagen
Height=h.GetImageHeight; %Altura de la Imagen
image=uint8(zeros(Width,Height));

% h.SetImageSize(Width,Height);

Si=h.GetColorMode; %Confirmamos la dimensión de la matriz.
if Si==0 %4 Bytes por pixel RGB 32 mode
    Col=4;
elseif Si==1 %3 Bytes por pixel RGB 24 mode
    Col=3;
elseif Si==6 %Escala de grises
    Col=1;
else
    uiwait(errordlg('tamaño error', ''));
end
ImSize=int32(Height*Width*Col); %Creamos variable formateada a 8 bits
con la dimensión de la imagen RGB.
hMem=h.GetImageMem; %Asignamos memoria para guardar la imagen.
h.SetMemoryMode(round(4096000/(Width*Height)),50);

disp('listo para capturar');
while 1

```

```

h.FreezeImage(1);           %Captura una imagen con un timer de 10 fps (aprox)
hMem=h.GetImageMem;        %Asignamos memoria para guardar la imagen.
u=CopyImage_Matlab(hMem,ImSize);%Recupera en un vector uint8 los datos de
la imagen grabada
% return
I=reshape(u(3:4:end),1280,1024); %
aa=sum(sum(I(:, :)));
    if(aa>140000000)
        disp('Inicio');
        break
    end
end

for p=1:150
    h.FreezeImage(1); %Captura una imagen con un timer de 10 fps (aprox)
    hMem=h.GetImageMem; %Asignamos memoria para guardar la imagen.
    u=CopyImage_Matlab(hMem,ImSize); %Recupera en un vector uint8 los
    datos de la imagen grabada
pause(0.3)
I=reshape(u(3:4:end),1280,1024); %
aa=sum(sum(I(:, :)));
    if(aa>140000000)

```

## ANEXO D. ALGORITMO DE PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES

```

% Read and filter the image
h1 = fspecial('disk',9); %Create predefined 2-D filter
I1=imfilter(imfilter(I,h1),h1); %N-D filtering of multidimensional
images
I2=im2bw(I1,0.45); %Convert image to binary image, based on threshold
0.15 45

se=strel('disk',9); %Create morphological structuring element
IM2=imclose(I2,se); %Morphologically close image
BW=imerode(IM2,se); %Erode image

h2 = fspecial('disk',15); %Create predefined 2-D filter
I3=imfilter(BW,h2); %N-D filtering of multidimensional images

%% Create a circle filter H=circle(Nx,Ny,Cx,Cy,R)
H1=circle(1024,1280,511,643,510);
H2=circle(1024,1280,511,643,500);
H=xor(H1,H2);

%% Results
Im=H.*I3;

```

```

[L,N] = bwlabel (Im,8);      %Label connected components in 2-D binary
image
CT_det (:,p)=N-1;
pause(2.1)
    else
        break
    end
end

%% decodificación

for i=1:length(CT_det)
    if CT_det(i)== 1
        CT_det(i)=-31;
    else
        if CT_det(i)==28
            CT_det(i)=145;
        end
    end
end
Texto_Recibido=char(CT_det + 63)
close all

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

function H=circle(Nx,Ny,Cx,Cy,R)
H=zeros(Ny,Nx);
X=linspace(Cx-R,Cx+R-1,2*R);
Y=Cy+sqrt(R^2-(X-Cx).^2);

for i=1:2*R
    H(Cy:round(Y(i)),round(X(i)))=1;
end

Y=Cy-sqrt(R^2-(X-Cx).^2);
for i=1:2*R
    H(round(Y(i)):Cy,round(X(i)))=1;
end

Y=linspace(Cy-R,Cy+R-1,2*R);
X=Cx+sqrt(R^2-(Y-Cy).^2);
for i=1:2*R
    H(round(Y(i)),Cx:round(X(i)))=1;
end

X=Cx-sqrt(R^2-(Y-Cy).^2);
for i=1:2*R
    H(round(Y(i)),round(X(i)):Cx)=1;
end

```