

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES (E3T)

APÉNDICES

Codificación y Decodificación a partir del Momento Angular
Orbital de la Luz y GNU Radio

Deiby Fernando Ariza Cadena

Código: 2195590

Director:

Dr. Omar Javier Tijero Rojas

Bucaramanga

2025

Apéndice A: Instalación y Configuración del Sistema

Este apéndice proporciona las instrucciones necesarias para instalar, configurar y ejecutar el sistema de comunicación óptica basado en Momento Angular Orbital (OAM) desarrollado en este trabajo.

1.1 Repositorio del Código Fuente

El código fuente completo del sistema está disponible públicamente en GitHub:

<https://github.com/DeibyArizac/OAM>

El repositorio incluye todos los módulos del sistema (codificador, decodificador, canal atmosférico, visualizadores), bloques personalizados para GNU Radio Companion, scripts de instalación, documentación completa de uso, y ejemplos de configuración para diferentes escenarios atmosféricos.

Una copia estática del código fuente al momento de la entrega de este trabajo se incluye como anexo separado en formato comprimido.

1.2 Requisitos del Sistema

El sistema requiere las siguientes dependencias de software, presentadas en la Tabla A1.

Tabla A1

Requisitos de software para el sistema OAM

Componente	Versión Mínima	Propósito
Sistema Operativo	Linux (Ubuntu 20.04+)	Entorno de ejecución
Python	3.8+	Lenguaje de programación
GNU Radio	3.10+	Plataforma de procesamiento
NumPy	1.19+	Cálculo numérico
SciPy	1.5+	Funciones especiales (Laguerre)
Matplotlib	3.3+	Visualización de resultados
PyQt5	5.15+	Interfaz gráfica

1.3 Instalación Básica

Los pasos de instalación del sistema son los siguientes:

1.3.1 Clonar el repositorio

Desde una terminal de Linux, ejecutar:

```
git clone https://github.com/DeibyArizac/OAM.git
cd OAM
```

1.3.2 Instalar dependencias

En sistemas basados en Debian/Ubuntu:

```
sudo apt update
sudo apt install gnuradio python3-numpy python3-scipy \
                python3-matplotlib python3-pyqt5
```

1.3.3 Verificar la instalación

Comprobar que GNU Radio y Python están correctamente instalados:

```
gnuradio-companion --version
python3 --version
```

1.4 Configuración del Sistema

Todos los parámetros del sistema se controlan desde el archivo `oam_system_config.py`, que centraliza la configuración de número de modos OAM, longitud de onda del láser, resolución de la grilla computacional, distancia de propagación, parámetro de turbulencia atmosférica (C_n^2), y SNR objetivo del enlace.

Los parámetros más importantes se presentan en la Tabla A2.

Tabla A2

Parámetros configurables del sistema

Parámetro	Valor Típico	Descripción
num_oam_modes	2, 4, 6, 8	Número de modos OAM activos
wavelength	630e-9 m	Longitud de onda del láser
grid_size	512 píxeles	Resolución de cálculo (NxN)
propagation_distance	50 m	Distancia TX-RX
cn2	1e-15 m ^{-2/3}	Turbulencia atmosférica
snr_target	30 dB	SNR objetivo del enlace

Para modificar estos parámetros, editar el archivo `oam_system_config.py` en el directorio raíz del sistema. Cada cambio invalida el caché y fuerza un recálculo completo.

1.5 Modos de Ejecución

El sistema puede ejecutarse de dos formas principales:

1.5.1 Ejecución Python autónoma (recomendado)

El modo más eficiente es ejecutar el sistema directamente desde Python:

```
python3 oam_complete_system.py
```

Este modo ejecuta el sistema completo, genera datos en el directorio `current_run/` y lanza automáticamente los tableros de visualización configurados.

1.5.2 Ejecución vía GNU Radio Companion

Para visualización y presentación gráfica, se puede usar la interfaz visual de GNU Radio:

```
gnuradio-companion oam_complete_flowgraph.grc
```

Luego hacer clic en el botón *Run* (triángulo verde) para ejecutar la simulación.

1.6 Tableros de Visualización

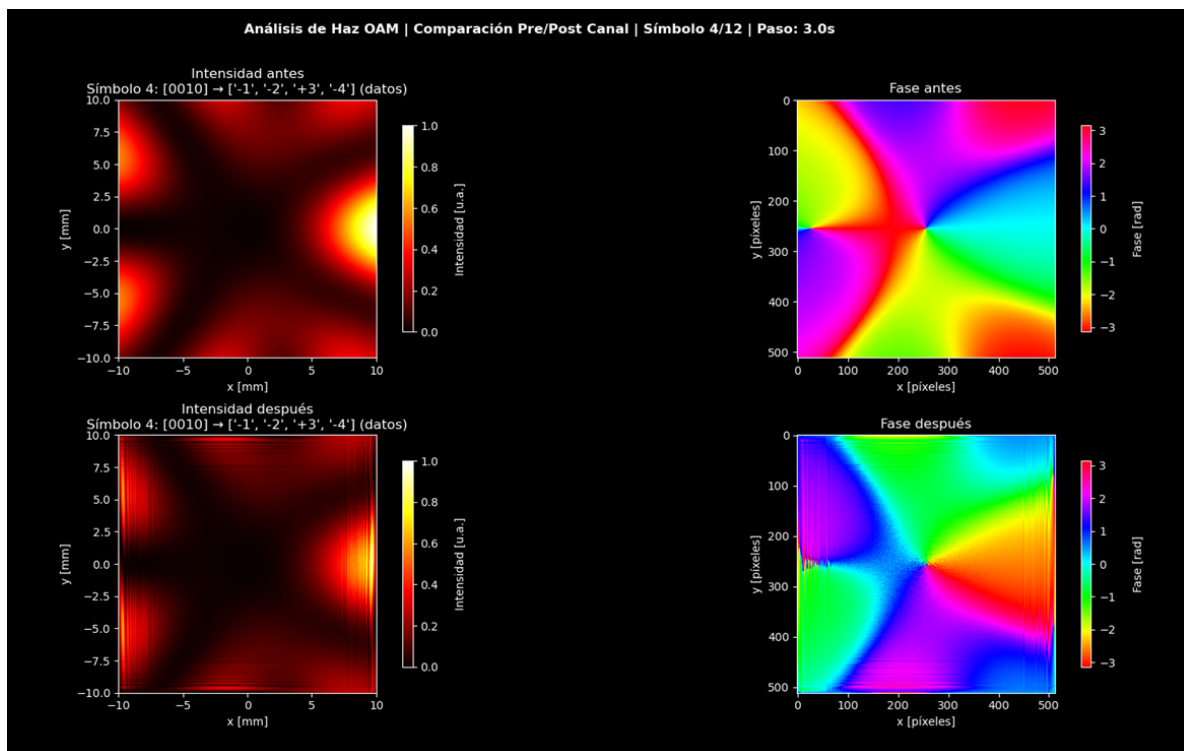
El sistema incluye cuatro tableros de visualización especializados para el análisis del enlace OAM. Estos tableros se generan automáticamente durante la ejecución y permiten monitorear la calidad del enlace, la degradación por turbulencia atmosférica, y la efectividad de la decodificación modal.

1.6.1 Tablero A: Análisis Temporal Comparativo

El Tablero A (Figura A1) visualiza dinámicamente la evolución temporal de los campos ópticos antes y después del canal atmosférico. Muestra los patrones de intensidad y fase de los haces Laguerre-Gaussian multiplexados, permitiendo observar directamente el impacto de la turbulencia sobre la estructura espacial de los modos OAM, especialmente la ruptura de simetría azimutal y la mezcla modal.

Figura A1

Tablero A: Análisis temporal comparativo

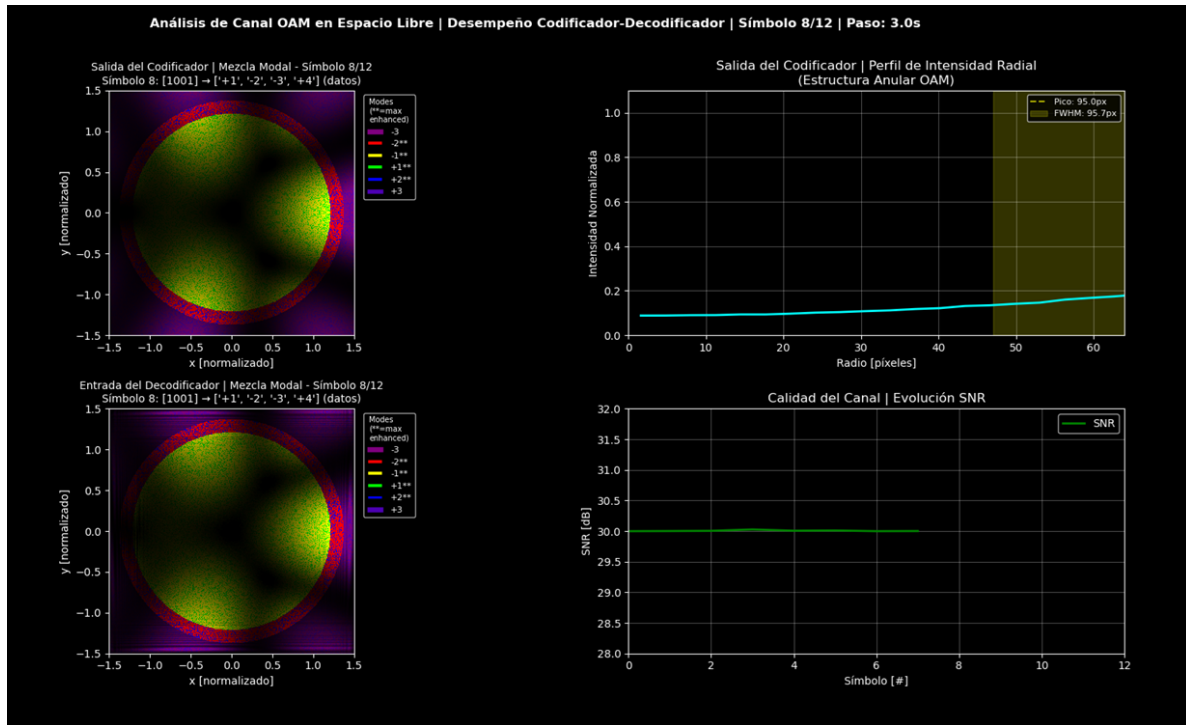


1.6.2 Tablero B: Métricas de Calidad

El Tablero B (Figura A2) es un tablero dinámico de aseguramiento de calidad que monitorea métricas cuantitativas del enlace OAM en cada símbolo transmitido. Incluye visualización de la mezcla modal (contribución de diferentes modos OAM en el campo recibido), perfil de intensidad radial, y evolución temporal de la relación señal-ruido (SNR) para identificar degradaciones en la calidad del enlace.

Figura A2

Tablero B: Métricas de calidad

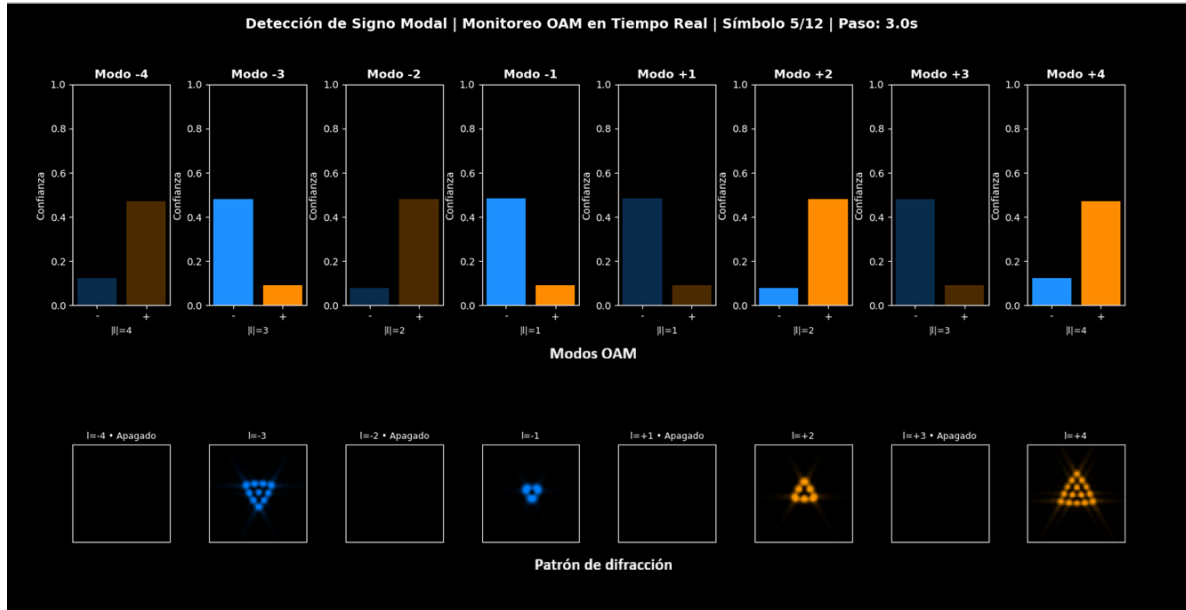


1.6.3 Tablero C: Detección Modal con Sign-Keying

El Tablero C (Figura A3) permite análisis detallado de la detección modal mediante patrones de difracción de Fraunhofer generados por una apertura triangular. La técnica de *sign-keying* discrimina el signo de la carga topológica ($+\ell$ vs $-\ell$) a través de la orientación característica de los patrones de difracción, complementando la proyección modal tradicional basada en correlación cruzada normalizada (NCC).

Figura A3

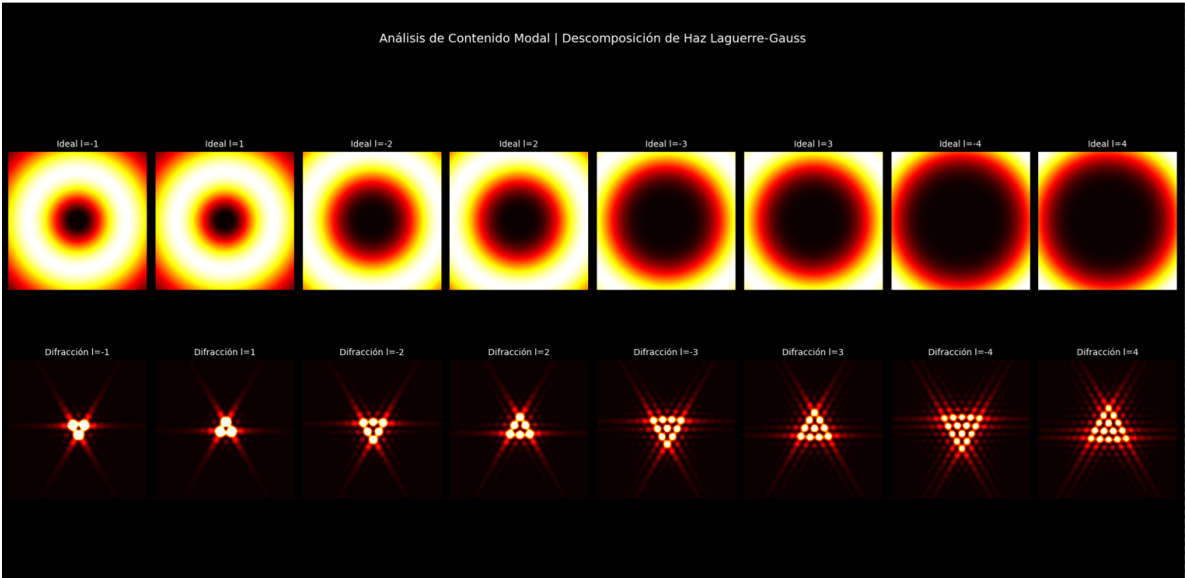
Tablero C: Detección modal con sign-keying



1.6.4 Estructura del Frente de Onda con Apertura Triangular

La Figura A4 ilustra el efecto de la apertura triangular sobre la estructura del frente de onda para los 8 modos OAM ($\pm 1, \pm 2, \pm 3, \pm 4$). La visualización muestra cómo la rendija modula el campo complejo de cada modo, generando patrones de difracción de Fraunhofer distintivos según el signo y magnitud de la carga topológica. Esta técnica es fundamental para la implementación del algoritmo de detección por *sign-keying*.

Figura A4
Estructura del frente de onda con apertura triangular



1.7 Estructura de Datos de Salida

El sistema genera datos en dos ubicaciones principales: `current_run/` para la simulación actual (se sobrescribe en cada ejecución), y `runs/<timestamp>/` para simulaciones archivadas históricamente.

Los archivos generados se describen en la Tabla A3.

Tabla A3
Archivos generados por el sistema

Archivo	Formato	Contenido
fields_*.npz	NumPy comprimido	Campos ópticos complejos
meta.json	JSON	Metadatos de simulación
metrics.jsonl	JSON Lines	Métricas por símbolo
config_hash.txt	Texto plano	Hash de configuración
.log	Texto plano	Registros del sistema

1.8 Solución de Problemas Comunes

1.8.1 Bloques no visibles en GNU Radio Companion

Si los bloques OAM no aparecen en GNU Radio Companion: (1) cerrar completamente GNU Radio Companion, (2) verificar instalación ejecutando `ls ~/.grc_gnuradio/blocks/oam*.yaml`, (3) volver a ejecutar el script de instalación `./install.sh`, y (4) reiniciar GNU Radio Companion.

1.8.2 Error de importación de módulos

Si aparecen errores `ModuleNotFoundError: oam*_wr`, configurar la variable `PYTHONPATH`:

```
export PYTHONPATH="${PYTHONPATH}:${pwd}"
python3 oam_complete_system.py
```

1.8.3 Archivos NPZ corruptos

Si hay problemas con datos corruptos, limpiar el caché:

```
rm -rf current_run/
rm -rf /tmp/oam/
```

Apéndice B: Escenarios de Simulación y Configuraciones Predefinidas

Este apéndice describe los escenarios de turbulencia atmosférica predefinidos utilizados en las simulaciones presentadas en el Capítulo de Resultados.

2.1 Clasificación de Condiciones Atmosféricas

El sistema implementa cuatro perfiles de turbulencia atmosférica predefinidos, basados en el parámetro de estructura del índice de refracción C_n^2 , presentados en la Tabla B1.

Tabla B1

Perfiles de turbulencia atmosférica

Condición	C_n^2 [$\text{m}^{-2/3}$]	Descripción
Laboratorio	1×10^{-16}	Sin turbulencia (controlado)
Débil	1×10^{-15}	Turbulencia atmosférica débil
Moderada	1×10^{-14}	Turbulencia atmosférica moderada
Severa	5×10^{-14}	Turbulencia atmosférica severa

2.2 Parámetros del Escenario de Laboratorio

El escenario de laboratorio simula condiciones ideales de propagación con turbulencia mínima. Los parámetros específicos son: distancia de propagación de 10 metros, longitud de onda de 633 nanómetros (láser HeNe), $C_n^2 = 1 \times 10^{-16} \text{ m}^{-2/3}$, SNR objetivo de 30 dB, y 6 modos OAM activos ($\pm 1, \pm 2, \pm 3$).

2.3 Parámetros del Escenario Exterior Moderado

El escenario exterior moderado simula condiciones de propagación en espacio libre con turbulencia atmosférica típica. Los parámetros específicos son: distancia de propagación de 50 metros, longitud de onda de 633 nanómetros, $C_n^2 = 1 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$, SNR objetivo de 25 dB, y 6 modos OAM activos.

2.4 Parámetros del Escenario Exterior Severo

El escenario exterior severo simula condiciones adversas con turbulencia atmosférica intensa. Los parámetros específicos son: distancia de propagación de 100 metros, longitud de onda de 633 nanómetros, $C_n^2 = 5 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$, SNR objetivo de 20 dB, y 6 modos OAM activos.

Apéndice C: Fundamentos Matemáticos Adicionales

Este apéndice proporciona detalles matemáticos complementarios a las ecuaciones presentadas en el Capítulo de Conceptos Previos.

3.1 Cálculo del Parámetro de Fried

El parámetro de Fried r_0 caracteriza la coherencia espacial del frente de onda tras propagación atmosférica. Se calcula mediante:

$$r_0 = \left(0,423 \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 C_n^2 L \right)^{-3/5} \quad (1)$$

donde λ es la longitud de onda, C_n^2 es el parámetro de estructura del índice de refracción, y L es la distancia de propagación. Valores típicos de r_0 van desde 5 cm (turbulencia severa) hasta varios metros (turbulencia débil).

3.2 Varianza de Fase de Kolmogorov

La varianza de fase acumulada sobre una apertura de diámetro D en propagación atmosférica se expresa como:

$$\sigma_\phi^2 = 1,03 \left(\frac{D}{r_0} \right)^{5/3} \quad (2)$$

Esta expresión cuantifica la distorsión de fase introducida por la turbulencia atmosférica y es fundamental para el diseño del algoritmo de generación de *phase screens*.

3.3 Espectro de Potencia de Kolmogorov

El espectro de potencia de las fluctuaciones del índice de refracción sigue el modelo de Kolmogorov:

$$\Phi_n(\kappa) = 0,033C_n^2\kappa^{-11/3} \quad (3)$$

donde $\kappa = 2\pi f$ es el número de onda espacial correspondiente a la frecuencia espacial f . Este espectro describe la distribución de energía de las fluctuaciones turbulentas en función de la escala espacial.

Apéndice D: Especificaciones Técnicas del Hardware de Referencia

Este apéndice describe las especificaciones del hardware utilizado para las pruebas de rendimiento del sistema reportadas en el Capítulo de Resultados.

4.1 Computadora de Desarrollo

El sistema fue desarrollado y probado en una computadora con las siguientes características: procesador Intel Core i7-10700K (8 núcleos, 16 hilos, 3.8 GHz base, 5.1 GHz turbo), 32 GB de memoria RAM DDR4-3200 MHz, almacenamiento SSD NVMe de 1 TB, y sistema operativo Ubuntu 22.04 LTS (kernel 5.15).

4.2 Tiempo de Ejecución

Los tiempos de ejecución típicos para una simulación completa (100 símbolos) en el hardware de referencia son: escenario de laboratorio (`grid_size=512`) aproximadamente 45 segundos, escenario exterior moderado (`grid_size=512`) aproximadamente 60 segundos, y escenario exterior severo (`grid_size=512`) aproximadamente 75 segundos.

Para simulaciones con resolución aumentada (`grid_size=1024`), los tiempos se incrementan aproximadamente por un factor de 4 debido al costo cuadrático de las transformadas de Fourier bidimensionales.

Apéndice E: Licencia y Uso del Código

Este apéndice describe los términos de uso y distribución del código fuente desarrollado en este trabajo.

5.1 Licencia del Software

El código fuente del sistema OAM se distribuye bajo licencia de código abierto MIT (Massachusetts Institute of Technology License), que permite uso comercial, modificación, distribución y uso privado, sujeto a la inclusión del aviso de copyright y la licencia en todas las copias o porciones sustanciales del software.