

ANÁLISIS DEL TRANSPORTE DE SEÑALES DE RADIOFRECUENCIA UTILIZANDO  
MULTIPLEXACIÓN POR DIVISIÓN DE FRECUENCIAS ORTOGONALES ÓPTICO

BRIGITTE NATHALIE ORTIZ LONDOÑO

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA

ESCUELA DE INGENIERÍAS

MAESTRÍA EN INGENIERÍA

MEDELLÍN

2019

ANÁLISIS DEL TRANSPORTE DE SEÑALES DE RADIOFRECUENCIA UTILIZANDO  
MULTIPLEXACIÓN POR DIVISIÓN DE FRECUENCIAS ORTOGONALES ÓPTICO

BRIGITTE NATHALIE ORTIZ LONDOÑO

Trabajo de grado para optar al título de Magíster en Ingeniería

Director

FERNEY ORLANDO AMAYA FERNÁNDEZ

Doctor en Ingeniería

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA

ESCUELA DE INGENIERÍAS

MAESTRÍA EN INGENIERÍA

MEDELLÍN

2019

18 de junio de 2019

Brigitte Nathalie Ortiz Londoño

“Declaro que esta tesis (o trabajo de grado) no ha sido presentada para optar a un título, ya sea en igual forma o con variaciones, en esta o cualquier otra universidad” Art 82 Régimen Discente de Formación Avanzada.

*Brigitte Nathalie Ortiz L*  
Firma

A la memoria de mi padre.

## **AGRADECIMIENTOS**

Quiero aprovechar este espacio para agradecer a todas las personas que permitieron que este proyecto se hiciera realidad.

A mi esposo, por creer en mí, permanecer a mi lado y ser mi polo a tierra.

A mi director, por acompañarme todo el proceso a pesar de las subidas y bajadas.

A mi familia, por su paciencia y apoyo incondicional.

Y sobre todo a Dios, por ser el artífice de este gran logro, porque todo lo puedo en él que me fortalece.

## CONTENIDO

LISTA DE FIGURAS	9
LISTA DE TABLAS	12
RESUMEN	13
1. INTRODUCCIÓN	14
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	15
1.2. OBJETIVO GENERAL	16
1.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
1.4. METODOLOGÍA DESARROLLADA	17
1.5. APORTE DEL TRABAJO DE GRADO	17
1.6. DELIMITACIÓN DEL MODELO DESARROLLADO	18
1.7. ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO	19
2. MODELO DE OFDM ÓPTICO Y RADIO SOBRE FIBRA	21
2.1. PARÁMETROS DE LA SIMULACIÓN	22
2.2. COMUNICACIONES ÓPTICAS	23
2.3. MULTIPLEXACIÓN POR DIVISIÓN DE FRECUENCIA ORTOGONAL ÓPTICA (OFDM ÓPTICO)	24
2.3.1. Ventajas y desventajas de OFDM convencional	25
2.3.2. Funcionamiento de OFDM	26
2.4. PRIMERA ETAPA DEL MODELO: OFDM ÓPTICO	31
2.4.1. Símbolo OFDM	31
2.4.2. Portadoras de datos	32
2.4.3. Portadoras piloto	32

2.4.4.	Transformación de la cadena de bits de serie a paralelo	33
2.4.5.	Modulación digital de los símbolos	34
2.4.6.	Transformada Inversa Rápida de Fourier (IFFT)	34
2.4.7.	Prefijo cíclico	35
2.5.	SISTEMAS DE RADIO SOBRE FIBRA ÓPTICA	37
2.6.	SEGUNDA ETAPA DEL MODELO: RADIO SOBRE FIBRA	37
2.6.1.	Modulación en ROF	37
2.7.	CANAL ÓPTICO	39
2.7.1.	Principales efectos en la propagación de señales a través de la fibra óptica	40
2.8.	TERCERA ETAPA DEL MODELO: CANAL ÓPTICO	44
2.8.1.	Transmisión en el canal óptico	47
2.9.	CUARTA ETAPA: RECUPERACIÓN Y TRATAMIENTO DE SEÑAL EN EL RECEPTOR	49
2.9.1.	Compensación digital <i>Back Propagation</i>	50
2.9.2.	Demodulación de señal de RF – conversión a banda base	51
2.9.3.	Supresión del prefijo cíclico	52
2.9.4.	Transformada rápida de Fourier	53
2.9.5.	Ecuación utilizando las portadoras piloto	54
2.9.6.	Demodulación digital de la señal	55
2.9.7.	Transformación de la cadena de bits de paralelo a serie	56
2.9.8.	Supresión de portadoras piloto	56
2.9.9.	Errores en las portadoras de datos	57
3.	CAMPAÑA DE SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS EFECTOS DE PROPAGACIÓN EN LA TRANSMISIÓN DE SEÑALES EN UN CANAL ÓPTICO UTILIZANDO OFDM ÓPTICO Y RADIO SOBRE FIBRA	60
4.	CONCLUSIONES	72
5.	RECOMENDACIONES	74

BIBLIOGRAFÍA	75
ANEXO 1: MÉTODO DE <i>SPLIT STEP FOURIER</i> PARA LA SOLUCIÓN DE LA NLSE	80
ANEXO 2: RESUMEN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN LA CAMPAÑA DE SIMULACIÓN	83



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Transmisor del modelo de OFDM óptico y ROF desarrollado	21
Figura 2 Receptor del modelo de OFDM óptico y ROF desarrollado	22
Figura 3 Prefijo cíclico en un símbolo OFDM	29
Figura 4 Construcción del símbolo: portadoras de datos y portadoras piloto	33
Figura 5 Señal en el Tiempo luego de aplicar la IFFT.	35
Figura 6 Señal con Prefijo Cíclico en el tiempo	36
Figura 7 Señal modulada en RF en el tiempo	38
Figura 8 Señal modulada en RF en la frecuencia	38
Figura 9 Señal en Banda Base vs Señal en Radio sobre Fibra	39
Figura 10 Atenuación y dispersión y efecto Kerr al transmitir un pulso a través de una fibra óptica	44
Figura 11 Diagrama del método de <i>Split-step Fourier</i>	46
Figura 12 Señal recibida luego del canal óptico en el tiempo	48
Figura 13 Señal recibida luego del canal óptico en la frecuencia	48
Figura 14 Señal recibida con Ruido Blanco Gaussiano en el tiempo	49
Figura 15 Señal resultante de la aplicación de Back Propagation en el tiempo	50
Figura 16 Señal ecualizada al aplicar Back Propagation en la frecuencia	51
Figura 17 Señal ecualizada banda base en el tiempo	52
Figura 18 Señal ecualizada sin Prefijo Cíclico en el tiempo	53
Figura 19 Constelación de datos luego de aplicar la FFT	54
Figura 20 Constelación de datos luego de realizar la ecualización a partir de la información de las portadoras piloto	55

Figura 21 Señal resultante de la demodulación M-PSK	56
Figura 22 Secuencia de datos recibida luego del tratamiento de señal y supresión de las portadoras piloto	57
Figura 23 Errores en las portadoras de datos recibidas al realizar modulación de amplitud óptica	58
Figura 24 Errores en las portadoras de datos recibidas al realizar modulación de fase	58
Figura 25 Constelación de datos recibidos a 1, 333, 666 y 100 Km para el sistema desarrollado sin la utilización de estrategias para la compensación de errores.	63
Figura 26 Constelación de datos recibidos a 1, 333, 666 y 100 Km para el sistema desarrollado utilizando la estrategia de portadoras piloto para la compensación de errores.	63
Figura 27 Constelación de datos recibidos a 1, 333, 666 y 100 Km para el sistema desarrollado utilizando la estrategia de prefijo cíclico para la compensación de errores.	64
Figura 28 Constelación de datos recibidos a 1, 333, 666 y 100 Km para el sistema desarrollado utilizando la estrategia de <i>Back Propagation</i> para la compensación de errores	64
Figura 29 Constelación de datos recibidos a 1, 333, 666 y 100 Km para el sistema desarrollado utilizando las tres estrategias para la compensación de errores: portadoras piloto, prefijo cíclico y <i>Back Propagation</i> .	65
Figura 30 Distancia máxima sin errores vs número de símbolos de la modulación digital M-PSK.	67
Figura 31 Número promedio de errores vs número de símbolos de la modulación digital M-PSK	67
Figura 32 Desfase promedio y máximo para el sistema desarrollado sin la utilización de estrategias para la compensación de errores.	69
Figura 33 Desfase promedio y máximo para el sistema desarrollado utilizando portadoras piloto como estrategia para la compensación de errores	69
Figura 34 Desfase promedio y máximo para el sistema desarrollado utilizando prefijo cíclico como estrategia para la compensación de errores	70
Figura 35 Desfase promedio y máximo para el sistema desarrollado utilizando <i>Back Propagation</i> como estrategia para la compensación de errores	70

Figura 36 Desfase promedio y máximo para el sistema desarrollado utilizando las tres estrategias para la compensación de errores: portadoras piloto, prefijo cíclico y *Back Propagation*

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Parámetros originales de la simulación	60
Tabla 2 Campaña de simulación caso típico	61
Tabla 3 Variables cambiadas durante la campaña de simulación	66
Tabla 4: Distancia máxima sin errores y número promedio de errores en campaña de simulación	83

## RESUMEN

En este documento se presenta el desarrollo de un algoritmo, implementado en Matlab, que permite la transmisión de señales en un canal óptico utilizando la técnica de Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal (OFDM por sus siglas en inglés) en el medio óptico, es decir, OFDM óptico, radio sobre fibra (ROF por sus siglas en inglés) y el modelo matemático que describe un canal de fibra óptica.

Para la compensación del ruido y los efectos del canal óptico: atenuación, dispersión y efecto Kerr el modelo permite la implementación de hasta tres estrategias de procesamiento de señales en la recepción: la adición de las portadoras piloto, la adición del prefijo cíclico y la aplicación de *Back Propagation*.

También se presenta el análisis del modelo desarrollado a partir de las constelaciones de las señales a lo largo de la transmisión, centrándose en el desfase observado y el efecto de los diferentes esquemas de compensación de errores.

**PALABRAS CLAVES:** OFDM óptico, radio sobre fibra, canal óptico, prefijo cíclico, portadoras piloto, *Back Propagation*.

## 1. INTRODUCCIÓN

Las tendencias tecnológicas actuales como el Internet de las Cosas (IoT por sus siglas en inglés) y su evolución en el Internet de todo (IoE por sus siglas en inglés) han favorecido la masificación del Internet y por lo tanto el avance y desarrollo de aplicaciones, así como también procesos de automatización en industria, salud, comercio, cultura, educación, comunicaciones, entre otras, tales como correo electrónico, e-commerce, e-learning, navegación web, distribución de contenidos audiovisuales, alta definición en contenidos, entretenimiento bajo demanda, domótica, etc. [1], [2].

Los requisitos técnicos y de acceso a los datos para este tipo de aplicaciones evidencian la necesidad de aumentar los anchos de banda disponibles, lo que implica un uso mayor de la capacidad de las redes y un acceso a ellas por un número cada vez mayor de usuarios finales [1], [2].

Esta situación es el punto de partida para los desarrollos tecnológicos e investigaciones en el campo de las telecomunicaciones y considerando las necesidades de los usuarios en cuanto al ancho de banda y capacidad de los sistemas, las comunicaciones ópticas suelen ser la opción más viable para responder a estas demandas dadas sus ventajas frente a otros sistemas de comunicaciones.

La implementación de técnicas como OFDM óptico, buscan facilitar el incremento de la distancia y la velocidad de las transmisiones, sin embargo, se hace necesario realizar el análisis de los efectos del canal óptico en el desempeño de este tipo de sistemas y este trabajo de grado presenta un modelo que los incorpora, cuantifica los errores obtenidos y permite su compensación utilizando estrategias cómo la adición de portadoras piloto, la adición de prefijo cíclico y la aplicación del *Back Propagation*.

Este documento permite profundizar en la técnica de OFDM óptico, la cual requiere tratamiento digital de señales para la compensación de los efectos del canal óptico, entre los que se encuentran el ruido, la atenuación, dispersión y efecto Kerr; aspectos limitantes de la capacidad de este tipo de sistemas [3].

En la actualidad la implementación física de OFDM óptico incluye dos técnicas diferentes para su montaje: OFDM coherente óptico y OFDM por detección directa óptico [3].

## 1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El desarrollo de contenidos y servicios en internet, además del aumento de los equipos conectados tanto fijos como móviles permitió que en 2010 circularan en promedio 7.3 GBytes de tráfico mensual por usuario, cifra que permite pronosticar, según el estudio “Índice de Conectividad Visual” de Cisco, un incremento a 24.8 GBytes de tráfico mensual por usuario en 2015 [4].

Dicho estudio también revela que, de manera consistente con el aumento del tráfico, la velocidad de internet banda ancha a nivel mundial crecerá en los próximos años, pues en 2010 alcanzó en promedio 7 Mbps y se pronostica que las tasas de velocidad promedio lleguen a 28 Mbps para el año 2015 [5]. A partir del 1 de enero de 2019 el mínimo de banda ancha en Colombia corresponde a 25 Mbps [6].

Estos aspectos hacen notorio el incremento y desarrollo de contenidos, además la necesidad de aumentar tanto la capacidad como la velocidad de las redes; y por consiguiente requiriéndose desarrollo de nuevas estrategias para el transporte y procesamiento de los datos.

Una estrategia para el desarrollo de las redes ha venido desarrollándose desde el año 2006, esta se orienta hacia el transporte a través de fibra óptica de señales utilizando la técnica de multiplexación por división de frecuencias ortogonales, OFDM [7], esta técnica se ha adaptado de los sistemas inalámbricos para mejorar principalmente sus limitaciones de distancias, pues mientras el estándar de WIMAX, que utiliza OFDM como técnica de multiplexación, plantea una distancia máxima para comunicaciones inalámbricas de 50 Km y tasas de transmisión de hasta 75 Mbps para los casos en los que no hay línea de vista [8], con el empleo de la fibra óptica se han podido alcanzar distancias de hasta 80 Km con tasas de transmisión de hasta 10 Gbps utilizando otras técnicas de multiplexación, como la multiplexación por división de la longitud de onda densa, DWDM [9].

La utilización de OFDM a través de la fibra óptica requiere unos tratamientos específicos para la compensación de los efectos del canal, entre los que se encuentran el ruido, la atenuación, dispersión y efecto Kerr, debido a que son estos los limitantes para el aumento de las velocidades y la capacidad de los sistemas requeridos en el futuro [10]–[15].

El estado actual en cuanto al desarrollo e implementación de OFDM óptico incluye el desarrollo de dos técnicas diferentes para su montaje, estos son: OFDM coherente óptico y OFDM por detección directa óptico [16], el estudio de los efectos no lineales al utilizar OFDM coherente óptico [17], transmisiones experimentales que han llegado hasta 1 Tb/s a distancias de hasta 300 Km sin utilización de amplificadores o compensación de la dispersión [18], entre otras aplicaciones.

Es así como considerando los trabajos actuales se aborda el análisis y compensación de diferentes efectos del canal óptico (atenuación, dispersión y efecto Kerr) al transmitir una señal de radio frecuencia con la implementación de la técnica OFDM, se modela un sistema que incluye las siguientes características: modulación en amplitud óptica, modulación QAM eléctrica y procesamiento de señal en transmisión y recepción para estimar la respuesta de magnitud del canal y corregir errores.

Se espera que este análisis permita identificar el procesamiento de señal que se requiere para compensar las no linealidades de la fibra cuando se estima el canal, contribuyendo de esta manera a aumentar las potencias de transmisión en los sistemas ópticos, reduciéndose el uso de amplificadores y el costo energético que se requiere.

## **1.2. OBJETIVO GENERAL**

Construir un modelo computacional y matemático que permita analizar y compensar algunos efectos del canal óptico, sobre una señal de radiofrecuencia transportada mediante la técnica de multiplexación por división de frecuencias ortogonales, OFDM.

## **1.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Desarrollar por etapas el modelo matemático de un sistema de OFDM, que a su vez incluya el modelo de canal óptico y los efectos de la atenuación, dispersión y efecto Kerr.
- Implementar un simulador de OFDM sobre fibra óptica al que se le pueda variar la distancia y la tasa de bits.
- Realizar tratamiento digital de señales en la recepción del algoritmo computacional para compensar los efectos de propagación sobre una fibra óptica utilizando OFDM.
- Analizar los diferentes efectos de propagación como atenuación, dispersión y efecto Kerr que genera el modelo desarrollado sobre una fibra óptica utilizando OFDM.



## 1.4. METODOLOGÍA DESARROLLADA

Las actividades desarrolladas y presentadas en este documento con el propósito de alcanzar los objetivos propuestos fueron las siguientes:

- Revisión del estado del arte de OFDM óptico y radio sobre fibra.
- Conceptualización teórica acerca de (a) OFDM óptico, (b) radio sobre fibra y (c) efectos del canal óptico: atenuación, dispersión y efecto Kerr.
- Desarrollo del modelo que permite transportar una secuencia de datos (bits) utilizando OFDM óptico y radio sobre fibra, este modelo incluye tanto ruido blanco gaussiano, como los efectos del canal óptico (atenuación, dispersión y efecto Kerr) y permite seleccionar hasta tres estrategias de procesamiento de señales en la recepción: (a) adición de portadoras piloto, (b) adición de prefijo cíclico y (c) aplicación de *Back Propagation* para compensar los errores generados en el sistema.
- Utilizando los parámetros de una señal de tipo LTE y una frecuencia de radio de 2.4 GHz se realizan pruebas al modelo desarrollado y su correspondiente análisis, el cual parte de las constelaciones de las señales a lo largo de la transmisión, centrándose en el efecto al aplicar o no las diferentes técnicas de la compensación de errores y en el análisis del desfase de las señales recibidas para cada uno de estos casos a diferentes distancias.
- Identificación de trabajo futuro acerca del sistema desarrollado y conclusiones.

## 1.5. APORTE DEL TRABAJO DE GRADO

En este proyecto se desarrolla un algoritmo en Matlab que permite transportar secuencias de bits a través de fibra óptica utilizando OFDM óptico y radio sobre fibra; este modelo incluye los efectos esperados en un canal óptico: atenuación, dispersión, efecto Kerr y ruido blanco gaussiano; además permite seleccionar hasta tres estrategias para la compensación de errores: adición de portadoras piloto, adición de prefijo cíclico y la aplicación de *Back Propagation*.

El algoritmo desarrollado permite identificar la eficiencia medida, a partir de los bits errados en la recepción, de cada una de las estrategias de compensación utilizadas en el modelo

desarrollado, lo que permite a futuro aumentar las distancias de transmisión, bien sea por incremento en las potencias de transmisión o por el mejoramiento en la reconstrucción de señal en el receptor.

Resultado del proceso de indagación inicial del proyecto se publica el artículo:

*"Numerical techniques for fiber optics propagation analysis" en el 2013 IEEE Colombian Conference on Communications and Computing (COLCOM).*

*Autores: B. Ortiz-Londoño, D. Duque-Marín and F. Amaya-Fernández.*

*DOI: 10.1109/ColComCon.2013.6564837*

## **1.6. DELIMITACIÓN DEL MODELO DESARROLLADO**

La validación y la campaña de simulación realizadas al modelo desarrollado contemplan exclusivamente los efectos ópticos al transmitir una única secuencia de datos binarios a través de un canal óptico que utiliza radio sobre fibra y OFDM óptico, esto quiere decir que este sistema no considera los efectos del canal inalámbrico pues se utiliza todo el tiempo fibra óptica como único medio de transmisión.

El sistema no considera los aspectos relacionados con la sincronización ni sus efectos debido a que el sistema modelado no incluye los aspectos eléctricos en transmisión y recepción y el propósito principal de este proyecto está en el análisis y compensación de los efectos ópticos.

La fibra óptica modelada corresponde a una fibra óptica tipo estándar ITU-T-G.652 operando en la tercera ventana (1550 nm), a una potencia de 2mW y con un coeficiente no lineal de  $2 \times 10^{-3} /(\text{mW} \cdot \text{km})$ .

Los valores y parámetros empleados corresponden a señales típicas de OFDM óptico y valores comerciales de sistemas tipo LTE que se consideran apropiados para las pruebas desarrolladas al ser valores reales y comerciales de este tipo de sistemas.

Para facilitar la actualización del modelo, el análisis y la experimentación, al modelo desarrollado se le pueden cambiar diferentes parámetros tales como:

- Distancia de transmisión.
- Frecuencia de señal de radio sobre fibra.

- Número de portadoras del símbolo de OFDM óptico.
- Ancho de banda de la señal de OFDM óptico.
- Número de símbolos de la modulación PSK realizada a los datos originales antes de ser enviados a través del medio óptico.
- Señal a ruido.
- Atenuación.
- Dispersión.
- Gamma (parámetro de no-linealidad de la fibra).

De igual forma el modelo desarrollado permite implementar hasta tres estrategias de compensación de los efectos de la transmisión desarrollados: adición de prefijo cíclico, adición de portadoras piloto y aplicación de *Back Propagation*.

Se usa la Tasa de Error de Bits (BER) y la distancia máxima sin errores para determinar la eficiencia de las estrategias de compensación de errores incorporadas en el sistema. Adicionalmente teniendo en cuenta que en un sistema real los efectos de propagación como atenuación, dispersión y efecto Kerr se combinan entre ellos, el análisis de cada uno de estos efectos de forma individual restaría importancia al impacto de las estrategias de compensación de errores en una transmisión a larga distancia bajo las condiciones establecidas.

Pese a que inicialmente se considera que el sistema desarrollado utilice modulación en fase óptica, se ha encontrado que este tipo de modulación es menos eficiente para el sistema desarrollado y la modulación en amplitud óptica es más fácil y menos costosa al momento de implementarse.

## 1.7. ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO

Este documento desarrolla en el Capítulo 1 la Introducción, la cual incluye la presentación del proyecto, objetivos, alcances, etc.

En el Capítulo 2 se presenta la conceptualización teórica, el desarrollo matemático y la descripción del modelo desarrollado (en Matlab), de un sistema que permite transportar secuencias de bits a través de fibra óptica utilizando OFDM óptico y radio sobre fibra; este modelo incluye los efectos esperados en un canal óptico: atenuación, dispersión, efecto

Kerr y ruido blanco gaussiano, además permite seleccionar hasta tres estrategias para la compensación de errores: adición de portadoras piloto, adición de prefijo cíclico y aplicación de *Back Propagation* para compensar los errores generados en el sistema.

El modelo desarrollado se separa en cuatro etapas: (a) OFDM óptico, (b) radio sobre fibra, (c) canal óptico y (d) recuperación y tratamiento de señal en el receptor.

En el Capítulo 3 se presenta el análisis de las pruebas del al modelo desarrollado, el cual parte de las constelaciones de las señales a lo largo de la transmisión, centrándose en el efecto al aplicar o no las diferentes técnicas de la compensación de errores y en el análisis del desfase de las señales recibidas para cada uno de estos casos a diferentes distancias.

Para finalizar se presentan las recomendaciones, la identificación de trabajo futuro y las conclusiones.

## 2. MODELO DE OFDM ÓPTICO Y RADIO SOBRE FIBRA

En este capítulo se desarrolla la descripción y conceptualización teórica, con su respectivo desarrollo matemático, así como también el modelo desarrollado (en Matlab) de todas las etapas de un sistema que permite transportar secuencias de bits a través de fibra óptica utilizando OFDM óptico y radio sobre fibra. El modelo incluye los efectos esperados en un canal óptico: atenuación, dispersión, efecto Kerr y ruido blanco gaussiano.

El modelo desarrollado contempla la transmisión de una única secuencia de bits y no analiza los posibles efectos de un canal inalámbrico dado que toda la transmisión se hace en el medio óptico.

Este desarrollo permite la construcción del modelo de OFDM óptico con radio sobre fibra que se presenta en la Figura 1 y la Figura 2; los pasos circulados con azul corresponden a los diferentes elementos que se han agregado al modelo para facilitar la implementación de las tres estrategias de compensación de errores utilizadas en el modelo desarrollado, las cuales pueden aplicarse de forma grupal o independiente: adición de portadoras piloto, adición del prefijo cíclico y aplicación del *Back Propagation*.

Cada una de las secciones desarrolladas en el modelo corresponde a cada una de las etapas de la transmisión: OFDM óptico, Radio sobre Fibra y Canal óptico; para el caso de la recepción se desarrolla en una única sección: Recuperación y Tratamiento de Señal en el receptor.

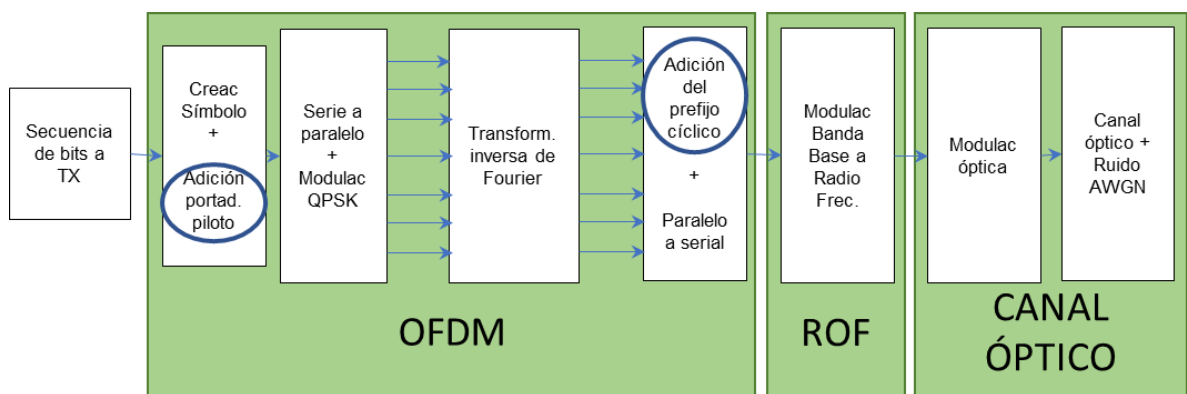


Figura 1 Transmisor del modelo de OFDM óptico y ROF desarrollado [3], [19]

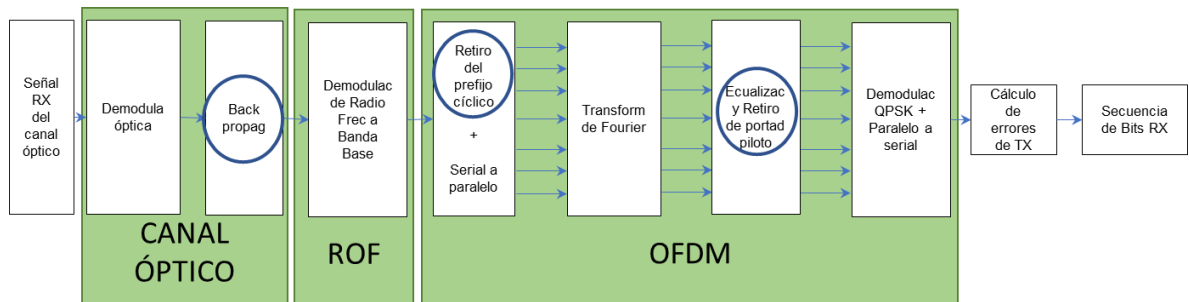


Figura 2 Receptor del modelo de OFDM óptico y ROF desarrollado [3], [19]

## 2.1. PARÁMETROS DE LA SIMULACIÓN

Dado que el propósito de este proyecto es construir un modelo que permita analizar y compensar algunos efectos del canal óptico, sobre una señal de Radio Sobre Fibra transportada mediante la OFDM óptico se utiliza para ilustrar el proceso de transmisión y recepción gráficas de las señales en algunos puntos del proceso, además se utilizan los parámetros de una fibra óptica tipo estándar ITU-T-G.652 que opera en la tercera ventana con los siguientes parámetros [20]:

- Longitud de onda central de la señal transmitida ( $\lambda$ ) 1550 nm
- Potencia óptica transmitida 2 mW
- Dispersión de segundo orden de la fibra 17 ps/nm/km
- Atenuación  $\alpha$  de la fibra óptica 0.2 dB/km
- Coeficiente no lineal de la fibra óptica ( $\gamma$ )  $2 \times 10^{-3} /(\text{mW} \cdot \text{km})$

Se emplea una longitud de fibra óptica máxima de 1000 km, lo que permite observar para diferentes distancias de simulación los efectos de propagación incorporados en este trabajo y la eficiencia de las estrategias de compensación de errores implementadas: la adición del prefijo cíclico, la adición de las portadoras piloto y la aplicación del *Back Propagation*:

- Longitud de la fibra óptica: 1000 km

Adicionalmente se emplearon los siguientes parámetros en el sistema desarrollado, estos corresponden a valores típicos de funcionamiento de diferentes tecnologías tipo OFDM óptico, tales como OFDM de banda única, OFDM de multibanda, OFDM completamente

óptico o OFDM sin intervalo de guarda, así como también valores comerciales de sistemas LTE [21].

Estos valores se han probado experimentalmente en las tecnologías ya mencionadas, por lo que se consideran apropiados para las pruebas desarrolladas en esta investigación, sin embargo, el sistema desarrollado permite cambiar el valor de las variables de entrada de acuerdo con las características específicas de cada prueba a realizar.

- Número de portadoras del símbolo OFDM: 128
- Número de símbolos en la modulación digital: 4
- Frecuencia de Radio: 2.4 GHz
- Ancho de banda del Símbolo: 20 MHz
- Relación Señal a Ruido: 20 dB
- Espaciamiento en frecuencia entre portadoras: 156.250 kHz
- Periodo de muestreo: 25 ns

## **2.2. COMUNICACIONES ÓPTICAS**

Las comunicaciones ópticas, que son aquellas que utilizan fibra óptica como medio de transmisión ofrecen mayor capacidad, alcance y confiabilidad en una red de telecomunicaciones que otros medios; actualmente este es el medio de transmisión dominante en las telecomunicaciones mundiales [22].

Desde el desarrollo de la fibra óptica a mediados del siglo XX, con la propuesta de Kao y Hockham, de utilizarla para la transmisión de señales luminosas y su masificación tal y como lo hizo el internet desde finales de los años 80, impulsadas por las cualidades técnicas y funcionales, así como también por la capacidad de transportar tráfico a través de la fibra óptica, se han logrado avances y desarrollos significativos en este medio de transmisión, dadas las necesidades de interconexión, de aumento de velocidad en los medios cableados, incremento en las distancias máximas sin necesidad de regeneración y que este tipo de medios llegan más cerca de los hogares, todo esto sin mayores incrementos en los costos energéticos y materiales [3], [22], [23].

Debido a la masificación de las redes metropolitanas, un gran desafío para las comunicaciones ópticas es el desarrollo de dispositivos de procesamiento de señales

completamente ópticos que permitan, evitando la conversión electro-óptica de las señales, a un bajo costo, la supresión eficiente de interferencias entre canales adyacentes, la distorsión entre pulsos y la disminución de colisiones entre paquetes de datos [1].

Normalmente se acostumbra el uso de sistemas de comunicaciones ópticos principalmente en los segmentos de distribución y núcleo de la arquitectura jerárquica de las redes de datos y en la actualidad se hace cada vez más común su uso en los segmentos de acceso con altas tasas de transmisión, las cuales comercialmente se pueden conseguir de 40 a 100 Gbps, mientras que a nivel experimental se han logrado transmisiones de laboratorio de hasta 1.05 Pbps por enlaces con distancias que pueden ir entre los 100 Km sin necesidad de regeneración y los 1000 Km utilizando regeneración óptica [24]–[26].

El incremento en las tasas de transmisión hace evidente la sensibilidad de las señales a los efectos de la propagación a través de la fibra óptica, limitando el número de canales en técnicas como la de multiplexación por división de longitud de onda (*Wavelength Division Multiplexing*, WDM). En general se reducen los rangos de tolerancia de la fibra ante estos efectos en un orden de 100 veces cada vez que se aumenta 10 veces la velocidad de transmisión, haciendo que se requieran técnicas de procesamiento de señales y compensación de los efectos del canal. De otro lado, las técnicas de compensación, como su nombre lo indica, compensan los efectos de la fibra óptica y otros errores del sistema. El empleo de las técnicas de procesamiento de señal o de compensación requieren de un conocimiento detallado de la fibra óptica y sus efectos de propagación, lo que se presenta en las siguientes secciones [2], [3], [19], [22], [24], [27]–[34].

### **2.3. MULTIPLEXACIÓN POR DIVISIÓN DE FRECUENCIA ORTOGONAL ÓPTICA (OFDM ÓPTICO)**

Entre las estrategias empleadas para incrementar la capacidad de transmisión a través de la fibra óptica se encuentra la técnica de multiplexación OFDM óptico, que parte de la técnica de multiplexación OFDM en su forma convencional; ésta al igual que en el mundo inalámbrico ofrece una tolerancia alta a los problemas de desvanecimiento [21], [35].

La Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal (OFDM por sus siglas en inglés, *Orthogonal Frequency-Division Multiplexing*) es una modulación donde se divide la información a transmitir en diferentes señales en el dominio de la frecuencia, llamadas subportadoras, las cuales son ortogonales entre sí mejorando la eficiencia espectral del sistema y disminuyendo el espaciamiento entre señales que requieren otros sistemas de múltiples portadoras [3], [21], [35], [36]



Al utilizar OFDM óptico se requieren tratamientos de las señales diferentes a los utilizados en las comunicaciones inalámbricas debido a la condición de no linealidad del canal óptico, la dispersión continua en el dominio de la frecuencia, la coherencia del tiempo que facilita el proceso de estimación del canal y la invariabilidad de la frecuencia de transmisión de los sistemas ópticos [3].

Adicionalmente el uso de OFDM en vez de una modulación de una sola portadora requiere tratamientos especiales para los sistemas de transmisión y recepción, así como también el procesamiento de señal, sin embargo su gran beneficio es la reutilización de modulaciones que se consideraban no aptas para transmitir por fibra óptica a tasas de transmisión 40 Gbps, 100 Gbs o 1 Tbps gracias a la utilización de técnicas de radio sobre fibra en sistemas como OFDM óptico [3].

OFDM óptico difiere de acuerdo con su esquema de detección entre detección coherente y detección directa o no coherente. La principal ventaja de OFDM de detección directa es la facilidad en su implementación dada la sencillez de su detector, mientras que OFDM coherente tiene mejor eficiencia espectral, mejora la relación señal a ruido y es menos sensible a la dispersión por modo de polarización. Ambos casos buscan eliminar la necesidad de gestionar la distorsión en las comunicaciones ópticas [32], [36].

Un sistema de transmisión y recepción para OFDM óptico consta de un transmisor típico de OFDM, un enlace de fibra óptica y un receptor OFDM, este tipo de sistemas cumplen las mismas funcionalidades que los sistemas que utilizan la técnica de OFDM convencional, su diferencia es la adición del transformador electroóptico y el cambio de medio inalámbrico a medio óptico.

El transmisor de OFDM está compuesto de un buffer de almacenamiento que se transforma de serie a paralelo, un modulador digital (IQ), la transformada inversa de Fourier, el sistema de adición del prefijo cíclico, el transformador electroóptico y el transmisor óptico.

El modelo desarrollado en Matlab, parte de unos datos generados previamente y está centrado en el procesamiento de las señales a través del medio óptico, por lo cual incluye el procesamiento de señales que equivale al transmisor y receptor óptico.

### **2.3.1. Ventajas y desventajas de OFDM convencional**

Las principales ventajas de OFDM son [35]:

- Cada símbolo codificado viaja en una subportadora diferente.

- La reducción en la tasa de símbolos ayuda a disminuir la interferencia inter simbólica, a proteger ante los retardos y ante los desajustes de sincronización.
- Las portadoras ortogonales facilitan el proceso de ecualización principalmente en la frecuencia.

Las principales desventajas de OFDM son[35]:

- El sistema tiene un alto pico medio de potencia de radio (*Peak-to-Average Power Ratio*, PAPR) lo que quiere decir, que existen cambios considerables entre la potencia mínima y máxima instantánea en un símbolo. Esto exige, en caso de necesitarse, el uso de amplificadores de potencia lineales e incrementa los costos del sistema.
- La incorporación del prefijo cíclico y otros datos redundantes necesarios en la construcción del símbolo OFDM reducen la tasa de transferencia de bits.
- El sistema es sensible a los cambios en la frecuencia, ya que estos cambios afectan principalmente la ortogonalidad de las subportadoras y por lo tanto la eficiencia del sistema. Sin embargo, dado que este sistema se implementa en el medio óptico, el cual, se caracteriza por una invariabilidad en la frecuencia de transmisión, es decir, que no cambia en frecuencia, pero si en fase, esta desventaja no es significativa en un sistema de OFDM óptico.

### 2.3.2. Funcionamiento de OFDM

El concepto de OFDM fue desarrollado por Chang R. W. en 1966 en el artículo "*Synthesis of band-limited orthogonal signals for multi-channel data transmission*". En los sistemas de comunicaciones se comenzó a utilizar en los años 90 a partir de su estandarización por el IEEE para su uso en redes locales, su uso en sistemas ópticos se dio a comienzos del siglo XXI [19], [35].

La técnica OFDM es utilizada en esquemas de televisión y comunicaciones móviles como DAB (*Digital Audio Broadcasting*), DVD (*Digital Video Broadcasting*) y 4G LTE (*Long Term Evolution*), en la transmisión en redes de área local de alto rendimiento (*HiperLAN*) y en el estándar IEEE 802.11 para redes de área local no guiadas (WLAN), entre otros [19].

OFDM permite la transmisión simultánea de múltiples señales paralelas de banda angosta y surge como solución a los problemas de multitrayectoria existentes en las comunicaciones inalámbricas [30], [34], [35].

Es así como las modulaciones de OFDM que son empleadas en múltiples estándares de radio se han desarrollado y evolucionado, logrando su implementación a nivel óptico[28].

Adicionalmente, el desarrollo de OFDM óptico ha permitido la introducción de tecnologías de transporte para redes ópticas como es el caso de EON (*Elastic Optical Network* – Redes ópticas elásticas), las cuales permiten la transmisión en varias longitudes de onda, adaptación a múltiples velocidades y variación adaptativa de los recursos asignados [27], [33]

En OFDM el ancho de banda original se divide en un número de sub-bandas de tal forma que para cada banda el canal se puede considerar plano o no dispersivo, se utiliza la transformada rápida de Fourier para garantizar que las señales que viajan en cada una de las sub-bandas sean ortogonales entre ellas [19], [30].

Si dos señales son ortogonales cumplen la siguiente ecuación:

$$\int_{t_1}^{t_2} f(t)g(t) = 0 \quad \text{Ec. 1}$$

con las funciones  $f(t)$  y  $g(t)$  definidas en un intervalo  $[t_1, t_2]$ , esto quiere decir que si teniendo dos funciones ninguna influye sobre la otra en un intervalo de su dominio, entonces estas dos funciones son ortogonales [35].

La técnica de OFDM se puede explicar de la siguiente manera: un modem recibe grupos de datos en serie y lo distribuye en paralelo utilizando varios sub-canales, ortogonales entre sí, en este caso el ancho de banda de cada sub-canal es mucho más pequeño que el ancho de banda coherente del canal [19], [35], [37], [38].

El ancho de banda coherente corresponde a una medida estadística del rango de frecuencias en las cuales puede considerarse que el canal tenga respuesta plana en la frecuencia, es decir, la separación máxima en frecuencia en la que se considera que el canal tenga aproximadamente la misma ganancia y su incremento de fase sea lineal [19], [35], [37], [38].

A su vez cada sub-canal cuenta con un modulador a diferente frecuencia para sus respectivos datos, los datos modulados se ubican en cada una de las portadoras, todas estas adyacentes y separadas entre sí  $\Delta f$ , logrando entre todo el sistema un ancho de banda total de  $N\Delta f$ , siendo  $N$  el número de portadoras del sistema, lo que quiere decir que la señal OFDM corresponde a la combinación de estas señales moduladas [19], [35].

Los sistemas OFDM incluyen aspectos que les brindan estabilidad, tal como lo es garantizar que la dispersión del canal no supere la separación entre las portadoras consecutivas y el tiempo de prefijo cíclico, aspectos que se desarrollan en este documento a medida que se construye paso a paso el modelo.

El proceso en la recepción es el inverso a ya mencionado, es decir, cada uno de los  $N$  sub-canales se demultiplexan y cada una de las señales demultiplexadas se demodula, luego se recombinan las señales utilizando un conversor paralelo a serie para obtener la señal recibida.

En OFDM cada sub-canal transmite uno de los  $N$  símbolos de un paquete a una velocidad hasta  $N$  veces menor que un sistema que transmite estos mismos datos en serie, de esta forma si ocurre un desvanecimiento de la señal, sólo una fracción de los símbolos OFDM se vería afectada y utilizando procesamiento de señal en la recepción y técnicas de compensación de errores se podría recuperar la información perdida; de igual forma la velocidad reducida permite incrementar el período del símbolo y ayuda a que éste se vea menos afectado por la dispersión del canal [19].

La principal desventaja de este tipo de sistemas es su complejidad frente a otros sistemas en serie, pues se requieren  $N$  moduladores,  $N$  filtros de transmisión con un rango selectivo más pequeño y e igual cantidad de demoduladores y filtros para la recepción. Una forma de mitigar esta complejidad es a través del uso de la Transformada de Fourier la cual permite garantizar que las señales de los diferentes sub-canales del sistema sean ortogonales [19]. Generalmente se emplea la Transformada Rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform*, FFT) que emplea un algoritmo computacionalmente eficiente para generar la Transformada de Fourier.

Cada una de las bandas de frecuencia del sistema está separada por un intervalo de guarda que garantiza que no haya interferencia entre las señales adyacentes, sin embargo, al utilizar señales ortogonales y una modulación digital (IQ) se permite un grado de solapamiento entre estas señales, pues estas se podrán recuperar siempre y cuando se utilice detección coherente y se garantice la ortogonalidad original, lo que se logra al utilizar la FFT como ya se ha mencionado [19].

Las dos interferencias que aparecen al utilizar la FFT como herramienta para garantizar la ortogonalidad de los sub-canales son la interferencia inter simbólica (*Intersymbol Interference*, ISI) y la Interferencia entre portadoras (*Intercarrier interference*, ICI).

- **ISI:** corresponde al solapamiento entre símbolos consecutivos, generalmente debido al efecto de la dispersión; este fenómeno aumenta el error y la pérdida de información, por lo cual es necesario limitar la tasa de transmisión de bits, sin embargo para el caso de los símbolos OFDM esta suele compensarse incluyendo un prefijo cíclico [3], [19].

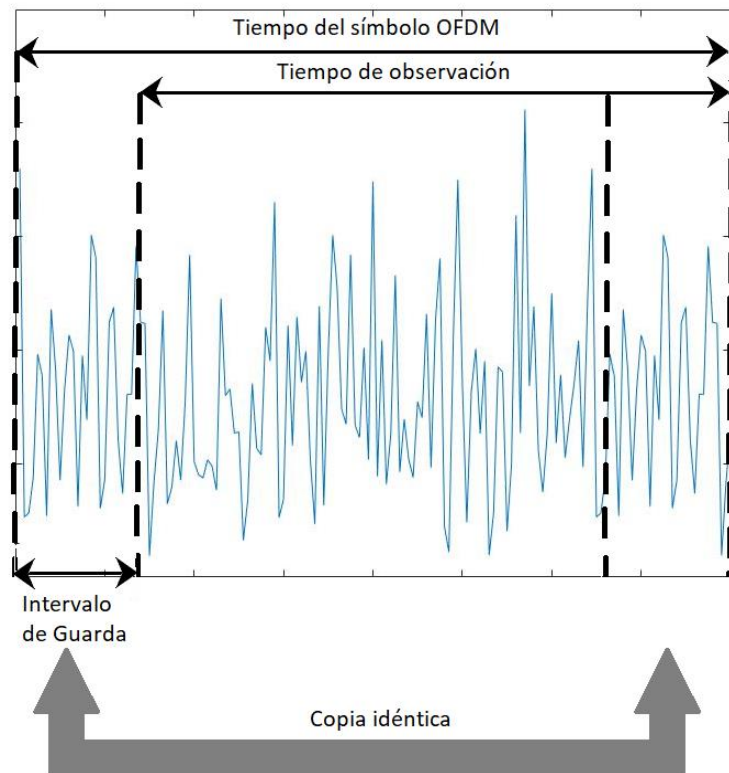


Figura 3 Prefijo cíclico en un símbolo OFDM [35]

- El prefijo cíclico se construye agregando una parte del inicio del símbolo OFDM original al final de este o una parte del final al principio del símbolo, esta información adicional aumenta la duración del símbolo, reduce la tasa efectiva de información y por lo tanto mitiga el efecto de la ISI, ver Figura 3. El prefijo cíclico no incluye información nueva en el símbolo, pero el aumento en la duración del mismo produce pérdida de ortogonalidad entre las sub portadoras, por lo cual es necesario considerar que la duración del prefijo cíclico esté dada en función del máximo retardo entre símbolos que ofrece el canal [19].
- En la recepción se elimina la información adicionada que tiene duración determinada por el prefijo cíclico, este es uno de los pasos requeridos para la recuperación y procesamiento de la señal transmitida.
- **ICI:** corresponde a una pérdida de la ortogonalidad entre frecuencias que pueden afectar la efectividad de la comunicación, sin embargo, cuando el cambio de la respuesta del canal se produce de manera muy lenta en comparación con el envío de símbolos OFDM, como en el caso de las comunicaciones ópticas, hay invariabilidad en la frecuencia, por lo cual este fenómeno no es notorio [19].

En un sistema OFDM al llegar al receptor los símbolos se verán afectados por cambios en amplitud y fase debido a los efectos del canal, por lo cual para compensarlos se deberá incluir una etapa de ecualización tanto de amplitud como de fase que contribuirá con la sincronización tanto en tiempo como en frecuencia entre el transmisor y el receptor OFDM [35].

Con este propósito se han desarrollado diferentes técnicas que simplifican el proceso de sincronización del receptor y la estimación del canal gracias a conocerse la ubicación de las portadoras piloto, algunos de estos son: métodos asistidos por pilotos, métodos guiados por decisión y métodos de estimación ciega de canal; en este proyecto se utiliza el método asistió por pilotos, el cual se puede o no utilizar a voluntad. [19].

Los efectos del canal generan principalmente degeneración de la señal recibida, lo que se traduce en bits errados durante la transmisión, que se pueden medir con alguno de estos dos parámetros: Tasa de Error de Bits (BER) o Magnitud del Vector de Error (EVM) [39], [40].

La BER mide el promedio de errores ocurridos en una transmisión y el EVM analiza los datos enviados y recibidos en una modulación digital (IQ), midiendo la relación en porcentaje entre la magnitud de error promedio de los símbolos recibidos y la magnitud del símbolo original, para poder conocer la calidad de la modulación y cualificar la desviación de los símbolos recibidos a partir de su posición ideal [41].

En el desarrollo de esta investigación, con los parámetros establecidos y para el caso específico de las señales procesadas se encontró que a medida que se realizaba el procesamiento de señal para cada una de las distancias simuladas, la señal recibida cambiaba de fase, y que dada la sensibilidad en el cambio de fase que detecta la demodulación M-PSK, procedimiento que es uno de los últimos realizados en la recepción del modelo desarrollado, la variación en la EVM no era concluyente, por lo cual se tomó la decisión de utilizar como referencia para el cálculo del error del sistema la BER [31], [42], [43], el cálculo de esta relación es el siguiente:

$$BER = \frac{\# \text{ de bit errados}}{\# \text{ total de bits}} \quad \text{Ec. 2}$$

## 2.4. PRIMERA ETAPA DEL MODELO: OFDM ÓPTICO

### 2.4.1. Símbolo OFDM

El símbolo OFDM se compone de  $N$  datos (que corresponde al número total de portadoras de datos y portadoras piloto) y que para este caso es de 128, separados tanto en el dominio del tiempo como en el dominio de la frecuencia, de acuerdo con los parámetros que garantizan una respuesta plana tanto en el tiempo como en la frecuencia. Cada portadora está modulada en M-PSK empleando  $N_s$  símbolos.

Los parámetros que permiten determinar estas dos variables son el tiempo de coherencia y el ancho de banda de coherencia.

Para garantizar que la respuesta del canal es plana durante la transmisión de los símbolos, se requiere que el ancho de banda del símbolo OFDM sea menor al ancho de banda de coherencia y que el tiempo del símbolo sea menor que el tiempo de coherencia lo cual se expresa como:

$$Bw(\text{símbolo}) \leq Bw_{\text{Coherencia}} \quad \text{Ec. 3}$$

$$Tiempo(\text{símbolo}) \leq Tiempo_{\text{Coherencia}} \quad \text{Ec. 4}$$

La frecuencia entre portadoras se calcula partiendo del ancho de banda de coherencia, para garantizar que la señal presente respuesta plana en el dominio de la frecuencia, es decir, se toma el ancho de banda de coherencia que en este caso es de 20 MHz, dados los parámetros originales del sistema, y se divide por la cantidad de portadoras del símbolo, que es 128, lo que corresponde a una separación entre portadoras, en el dominio de la frecuencia, de 156.250 kHz

$$Frecuencia \text{ entre portadoras} \leq \frac{Bw_{\text{símbolo}}}{\# \text{ de portadoras del símbolo}} \quad \text{Ec. 5}$$

### 2.4.2. Portadoras de datos

El sistema desarrollado utiliza una secuencia de datos aleatorios, la cual puede ser reemplazada por cadenas de datos que se requieran transmitir; cada uno de estos datos se denomina portadora de datos y representa un valor entero entre 0 y  $N_s - 1$ , donde  $N_s$  es potencia de 2 y equivale al número de símbolos de la modulación M-PSK utilizada.

Para el caso del diseño desarrollado corresponde a 2, pues se utiliza una modulación QPSK. Adicionalmente, cada portadora corresponde a un grupo de  $\log_2 N_s$  bits y se convierten en uno de los  $N_s$  posibles símbolos de la modulación IQ en uso, tal y como se puede observar en la Figura 4.

### 2.4.3. Portadoras piloto

La técnica OFDM establece que se inserten en ciertas posiciones del vector de datos a transmitir elementos con un valor previamente conocido, que se denominan portadoras piloto. Esta estrategia se utiliza para facilitar el procesamiento de señales en la recepción, al permitir la ecualización de la señal recibida, teniendo en cuenta respuesta plana a través de la frecuencia del canal utilizado durante la transmisión del símbolo que se garantiza al cumplir que el ancho de banda del símbolo sea menor que el ancho de banda de coherencia.

En este sistema se toma 16 como valor de referencia para la cantidad de portadoras piloto, dicho valor se utiliza teniendo en cuenta los valores utilizados en los diferentes modelos de OFDM encontrados en la literatura, que se asemejan al desarrollado. Esto quiere decir que en el símbolo de 128 elementos se cuenta con 112 portadoras de datos y 16 portadoras piloto.

En los sistemas analizados la forma de determinar el número de portadoras piloto, que va desde 0 hasta 16 principalmente, depende de la frecuencia de coherencia del canal, es decir, entre más plana es la respuesta del canal en la frecuencia, menor será el número de portadoras piloto que se debe adicionar en el modelo [2], [3], [19], [21], [22], [24], [28], [29], [35], [36]

La ubicación de las portadoras piloto, en el sistema desarrollado es en las posiciones: 1,9, 17, 25, 33, 41, 49, 57, 72, 80, 88, 96, 104, 112, 120 y 128 del símbolo; estas se ubican en posiciones tanto desde el comienzo como desde el final de símbolo, incluyendo una





### 2.4.5. Modulación digital de los símbolos

Cada uno de los elementos del símbolo es codificado, mediante el esquema de transmisión M-PSK (*Phase Shift Keying* Corrimiento de fase por llaveo), en esta técnica de modulación digital la información se modula en fase, es decir, dependiendo del valor de la entrada, cambia la fase de la señal de salida, además transforma los valores establecidos para cada portadora (datos y piloto) en elementos de la forma  $A + Bi$  o IQ como se conoce comúnmente. Este esquema permite la detección del valor de cada una de las portadoras a partir de su información de amplitud y fase [45], [46].

La principal ventaja al utilizarse se evidencia en la reconstrucción de la señal en el proceso de recepción.

La función matemática que define la señal modulada M-PSK se define como:

$$S_{PSK}(t) = \sqrt{\frac{2E_b}{T_b}} \cos(2\pi f_c t + \theta(t) + \theta_0) \quad \text{Ec. 6}$$

donde  $E_b$  es la energía del bit,  $T_b$  es la duración del símbolo y  $\theta(t)$  representan las diferentes fases y  $\theta_0$  es la fase inicial.

En el modelo desarrollado se utiliza 4 como número de símbolos de la modulación digital, lo que corresponde a una modulación QPSK.

### 2.4.6. Transformada Inversa Rápida de Fourier (IFFT)

La transformada inversa rápida de Fourier es un algoritmo computacionalmente eficiente que permite obtener la transformada inversa de Fourier [47].

En este sistema se utiliza para transformar del dominio de la frecuencia (en el que se encuentra la señal hasta el momento) por el dominio del tiempo y para contribuir con la ortogonalidad entre símbolos, que es una de las ventajas de OFDM.

La transformación se define como [48]:

$$f_{IFFT}(j) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N S_{PSK}(k) w_N^{-(j-1)(k-1)} \quad w_N = \exp\left(-\frac{2\pi i}{N}\right) \quad \text{Ec. 7}$$

Donde  $N$  corresponde al número total de elementos a transformar, que para este caso es 128.

A continuación, en la Figura 5 se presenta el símbolo luego de ser transformado por la IFFT, esta gráfica se adiciona con propósitos ilustrativos, buscando evidenciar paso a paso las transformaciones que sufre la señal a través del modelo desarrollado pues su interpretación excede los alcances del presente documento.

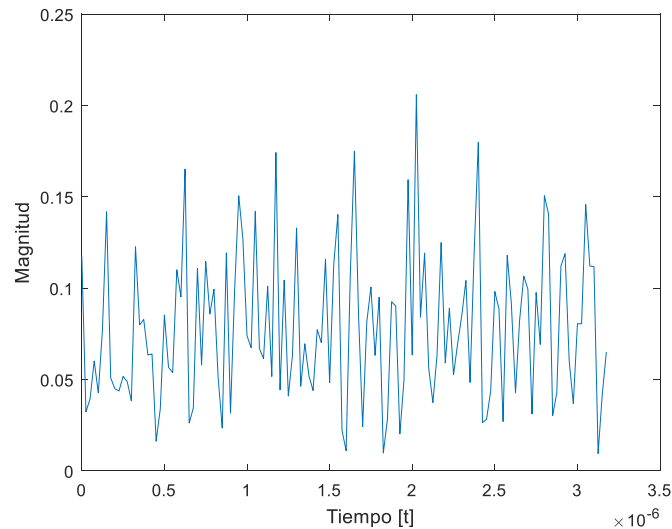


Figura 5 Señal en el Tiempo luego de aplicar la IFFT.

#### 2.4.7. Prefijo cíclico

Tal y como se ha mencionado anteriormente como estrategia para la mitigación de la interferencia entre símbolos, cuando se realizan transmisiones de secuencias consecutivas de símbolos, se adiciona el prefijo cíclico, cuya duración viene dada por el tiempo de coherencia del canal, que para el caso de las comunicaciones ópticas viene dado por:

$$\tau_G = \frac{DB_W C}{f^2} \quad \text{Ec. 8}$$

siendo  $D$  el coeficiente de dispersión cromática,  $B_W$  el ancho de banda del símbolo OFDM,  $c$  la velocidad de la luz y  $f$  la frecuencia central del símbolo [35].

El valor del Prefijo cíclico es una medida en tiempo, que convierte en un porcentaje o en una cantidad de símbolos que deberán adicionarse en la transmisión para mitigar el efecto

del ensanchamiento e interferencia inter-simbólica. De acuerdo con el medio utilizado puede ser de hasta el 30% en canales inalámbricos o inclusive inferior al 1% en un canal óptico como el estudiado en este trabajo.

Desarrollando la Ec. 8 con los parámetros de la simulación presentados en la sección 2.1, se establece la duración que debe tener el prefijo cíclico para el modelo implementado, cuyo valor corresponde a  $2.72 \times 10^{-12}$  segundos y al comparar este valor con la duración del símbolo OFDM que es  $2.50 \times 10^{-8}$  segundos, dado el ancho de banda de la señal generada, se encuentra que el prefijo cíclico mínimo para el sistema corresponde al 0.11% del tiempo de duración total del símbolo, es decir, que dadas las condiciones del canal y los parámetros del sistema no sería necesario adicionarle prefijo cíclico o a lo máximo un (1) solo componente en el tiempo para el desempeño óptimo del sistema. Sin embargo, con el propósito de validar el desempeño del prefijo cíclico en este tipo de sistemas se establece que, si el número de componentes a adicionar de acuerdo con el valor establecido del prefijo cíclico es inferior a 2, se adicionen 2 componentes en el tiempo.

Al desarrollar un sistema que utiliza esta estrategia de compensación de errores se debe garantizar que el tiempo de transmisión de cada símbolo OFDM sea inferior al tiempo de coherencia anteriormente establecido y que la velocidad del sistema considere este valor como referencia del tiempo mínimo de separación para el envío de los diferentes símbolos.

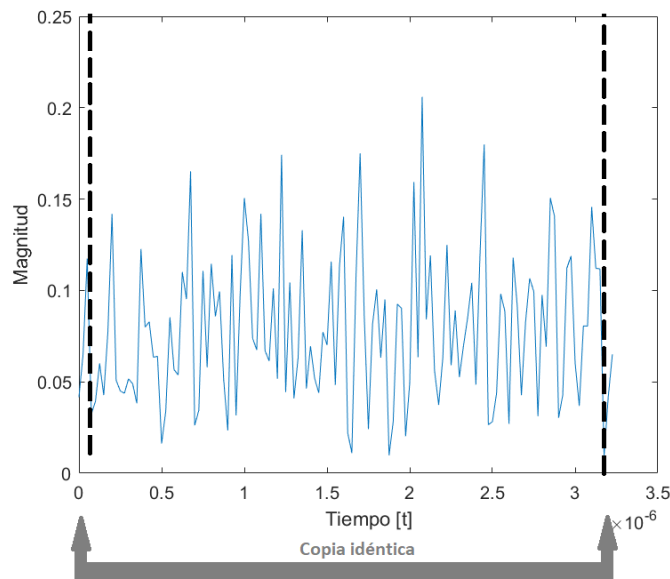


Figura 6 Señal con Prefijo Cíclico en el tiempo

La Figura 6 incluye la información de 2 (dos) componentes del final de la señal transmitida que se agregan al principio de esta, lo que representa una duración mayor, en el tiempo, del símbolo que se va a transmitir.

## 2.5. SISTEMAS DE RADIO SOBRE FIBRA ÓPTICA

Los sistemas de radio sobre fibra (*Radio over Fiber*, RoF), permiten incrementar los anchos de banda y disminuir los costos frente a otros sistemas de comunicaciones fijos y móviles, este campo se ha venido desarrollado desde la década de 1990, estos sistemas se caracterizan por la distribución a través de fibra óptica de señales de radiofrecuencia, las cuales, dependiendo de su aplicación, pueden ser VHF, UHF, microondas u ondas milimétricas, esto permite la entrega de manera eficiente de dichas señales para que puedan transmitirse de forma posterior a través de una antena de radiofrecuencia [49]–[51].

Este tipo de sistemas evitan la necesidad de generar la señal de radio portadora en la base de la antena, reduciendo costos, tamaños, consumo de potencia, simplificando y flexibilizando operacionalmente los sistemas al permitir el control de la frecuencia de radiación de manera central con respecto a la ubicación de las antenas [49].

Esta tecnología abarca aplicaciones como: como WiMax (interoperabilidad mundial para acceso por microondas, *Worldwide Interoperability for Microwave Access*) tanto de acceso fijo, como de acceso móvil, incluyendo la evolución de este último en LTE (*Long Term Evolution*), comunicaciones satelitales, redes de comunicación de radio móvil, banda ancha por radio, banda ancha móvil, distribución de video multipunto, comunicación y control de vehículos y radio LAN en redes ópticas [49]–[51].

Las soluciones de RoF permiten utilizar redes ópticas de forma más ágil y reconfigurable, aspecto fundamental para responder a las necesidades y demandas de los usuarios, constantemente cambiantes [3]. La mayoría de los sistemas de transmisión inalámbrica actuales emplean OFDM, por lo que un sistema de RoF debería considerar esta técnica.

## 2.6. SEGUNDA ETAPA DEL MODELO: RADIO SOBRE FIBRA

### 2.6.1. Modulación en ROF

Para lograr el transporte de señales de radio a través de fibra óptica es necesario modular a una frecuencia de radio  $w_c$  las señales en banda base que se desean transmitir, es por esto que en este proceso se toma una señal exponencial compleja cuya amplitud se modula

o multiplica por la señal de información, que para este caso corresponde a la señal resultante de la etapa anterior, es decir, de la señal con el prefijo cíclico[52].

La señal modulada es el producto de las dos señales (información  $x(t)$  y moduladora  $c(t)$ ) de la siguiente forma:

$$f_{RADIO}(t) = f_{IFFT}(t)e^{jw_c t} \quad \text{Ec. 9}$$

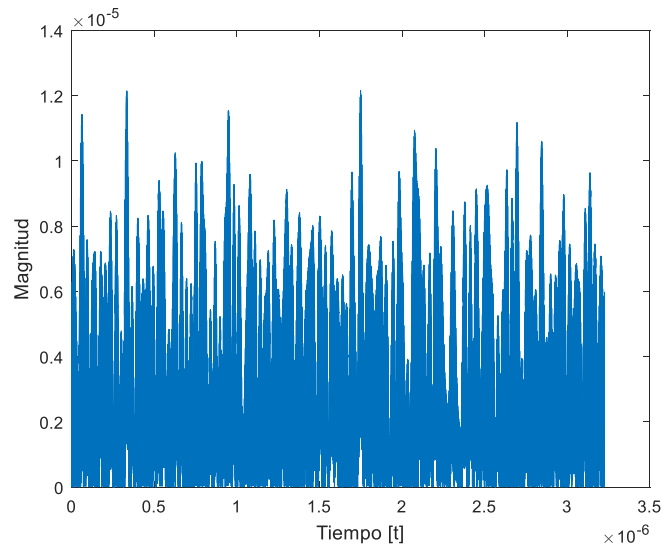


Figura 7 Señal modulada en RF en el tiempo

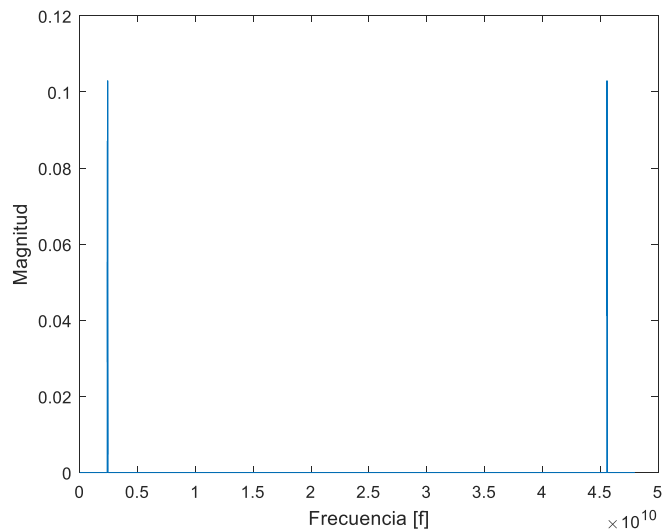


Figura 8 Señal modulada en RF en la frecuencia

La Figura 7 representa la señal modulada en RF en el dominio del tiempo, figura que podría no ser muy representativa, sin embargo, al analizar el espectro de frecuencia de la señal

resultante, se puede observar en la Figura 8 que en la frecuencia de RF de 2.4 GHz se encuentra la señal resultante del prefijo cíclico modulada en la frecuencia.

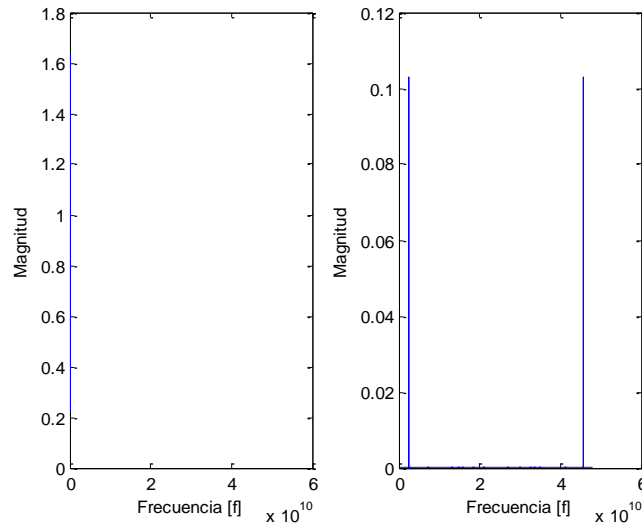


Figura 9 Señal en Banda Base vs Señal en Radio sobre Fibra

La Figura 9 representa la señal en Banda Base (izquierda) que se modula en la frecuencia de 2.4 GHz (derecha). El espectro observado en esta última figura corresponde a todo el espectro de frecuencia de la señal (por eso parece que su ancho de banda es del doble).

## 2.7. CANAL ÓPTICO

La fibra óptica, para su uso comercial, se fabrica con geometría cilíndrica y está compuesta por Sílice, es decir, dióxido de silicio - SiO<sub>2</sub>. De este material se forman su núcleo y el revestimiento que lo confina, cada uno con diferentes índices de refracción para facilitar la propagación de la luz, estos índices se logran gracias al dopaje de la fibra generalmente con germanio. En su proceso de fabricación se cubre a la fibra con capas adicionales de diversos materiales, como acrilato, que le ofrecen resistencia mecánica y la protegen de las adversidades del medio ambiente [20], [23].

Los desarrollos alcanzados en el proceso de fabricación tanto de la fibra óptica como de los elementos emisores de luz permiten que se logren transmisiones de varios kilómetros sin la necesidad de regeneración o amplificación de la señal que se transportan en la fibra

óptica, gracias a que se ha logrado disminuir las pérdidas por atenuación en este tipo de cables desde los iniciales 1000 dB/km y los 20 dB/km alcanzados en 1970 hasta los actuales 0.2 dB/km [3], [22], [53].

Una vez se superan las distancias máximas de transmisión de la fibra se hace necesario utilizar algún tipo de amplificación para garantizar la transmisión de extremo a extremo, aspecto que actualmente se encuentra en estudio, por la necesidad de mejorar los sistemas electro-ópticos, tanto por sus costos energéticos y financieros, como por sus limitaciones en cuanto a la regeneración de señales a altas tasas de bit [54].

Los primeros sistemas ópticos se diseñaron con fibras multimodo y emisores de luz tipo LED, operaban en el rango de longitud de onda entre los 0.8 y 0.9  $\mu\text{m}$ , tenían unas pérdidas típicas de 5 dB/km y tasas limitadas de bits. Estos sistemas evolucionaron permitiendo el uso de fibras monomodo y fuentes luminosas tipo laser que operan en el rango de los 1300 y 1550 nm, con las cuales se logró una disminución de las pérdidas hasta los 0.5 y 0.2 dB/km respectivamente y una dispersión mínima, permitiendo de esta manera aumentar las tasas de bits [20], [54].

Se destacan de la fibra óptica propiedades como [23], [54]:

- Capacidad para la transmisión de múltiples tipos de señales.
- Baja atenuación de la señal óptica.
- Inmunidad frente a las interferencias electromagnéticas.
- Cables ligeros, flexibles, de diámetro pequeño y con una larga vida útil.
- Bajos costos de fabricación, pues el material de la fibra óptica (sílice) es más abundante que el material principal de otro tipo de cables.
- Gran ancho de banda.

### **2.7.1. Principales efectos en la propagación de señales a través de la fibra óptica**

Las señales que se propagan a través de la fibra óptica se ven afectadas por diferentes fenómenos físicos tales como:

- **Atenuación:** disminución en la potencia de la señal a medida que esta se propaga por el medio, depende directamente de las propiedades físicas de la fibra óptica (forma y



materiales), este efecto se expresa en dB/km y se compensa normalmente mediante amplificación óptica [23].

- **Dispersión (*scattering*):** en general la dispersión se debe a que la respuesta de la fibra óptica varía con la frecuencia. Este fenómeno obedece principalmente a imperfecciones en la fabricación o materiales de la fibra y genera principalmente ensanchamiento y atenuación en la señal haciendo que pulsos consecutivos enviados a través de la fibra interfieran entre ellos. La dispersión es un efecto acumulativo que afecta tanto la distancia máxima de un enlace como la velocidad de transmisión [23], [36], [55]. Hay varias formas de dispersión:
  - **Dispersión intramodal o cromática:** esta dispersión se debe al material y a la guía de onda, haciendo que cada una de las componentes de frecuencia de la señal transportada viaje a velocidades diferentes, lo que se refiere a que la constante de propagación,  $\beta$ , que depende de forma no lineal de la frecuencia para un mismo modo de la fibra, genere un ensanchamiento de la señal en el dominio del tiempo. Este efecto suele compensarse con el uso de tramos de fibras compensadoras de dispersión (*Dispersion Compensating Fiber, DCF*), rejillas de Bragg (*Fiber Bragg Grating, FBG*) o métodos electrónicos de compensación y se expresa en ps/nm·km [23], [35], [36], [55].

La diferencia en las velocidades entre las diferentes componentes espectrales para el caso de la dispersión que se relaciona con el material se genera por la variación del índice de refracción con la longitud de onda. Es decir, que para el caso de la dispersión que se relaciona con la guía de onda lo hace porque las longitudes de onda más cortas están confinadas en el núcleo de la fibra, mientras que las longitudes de onda mayores se propagan en el revestimiento [56], [57].

El análisis de  $\beta$  parte de la definición de la velocidad con la que se propaga la fase en la fibra, es decir,

$$v_p = \frac{\omega}{k} \quad \text{Ec. 10}$$

con  $\omega$  la velocidad angular y  $k$  el número de onda.

Teniendo en cuenta que la constante de propagación  $\beta$  indica como viaja la fase en función del espacio y se desea que esté en términos de la frecuencia angular  $\omega$  para calcular los retardos en función de la frecuencia, despreciando los demás efectos y considerando que una señal óptica transmitida sólo se ve afectada por la dispersión cromática, la señal recibida se puede expresar cómo

$$X(\omega) = Y(\omega)e^{-j\beta(\omega)z} \quad \text{Ec. 11}$$

Si la frecuencia de portadora  $\omega_0$  es mucho mayor que  $\omega$  se puede considerar el siguiente desarrollo en series de Taylor para la constante de propagación  $\beta$

$$\beta(\omega) \approx \beta(\omega_0) + (\omega - \omega_0) \frac{\partial \beta}{\partial \omega}(\omega_0) + \frac{\partial \beta^2}{\partial \omega^2}(\omega_0) \frac{(\omega - \omega_0)^2}{2} + \frac{\partial \beta^3}{\partial \omega^3}(\omega_0) \frac{(\omega - \omega_0)^3}{6} + \dots \quad \text{Ec. 12}$$

Siendo los más relevantes los tres primeros coeficientes de esta serie

$$\beta_0 = \beta(\omega_0) \quad \text{Ec. 13}$$

$$\beta_1 = \frac{\partial \beta}{\partial \omega}(\omega_0)(\omega - \omega_0) \quad \text{Ec. 14}$$

$$\beta_2 = \frac{\partial \beta^2}{\partial \omega^2}(\omega_0) \frac{(\omega - \omega_0)^2}{2} \quad \text{Ec. 15}$$

Para estos coeficientes  $\beta_0$  es el término que indica la constante de propagación de la portadora,  $\beta_1$  es el retardo de grupo a una frecuencia  $\omega$  y los demás términos hacen referencia a la dispersión de la señal, de los cuales  $\beta_2$  es el más relevante, por lo cual la dispersión se representa de la siguiente manera

$$D(\omega_0) = \frac{\partial \omega}{\partial \lambda} \beta_2 = \frac{2\pi c}{\lambda_0^2} \beta_2 \quad \text{Ec. 16}$$

- **Dispersión intermodal:** esta dispersión ocurre únicamente en las fibras multimodo debido a los diferentes recorridos de los rayos que viajan por la fibra, como resultado de las constantes de propagación para cada uno de los modos. Este fenómeno se manifiesta como ensanchamiento en los pulsos transmitidos a medida que estos se propagan, generando un solapamiento de los pulsos y limitando la distancia de transmisión [23].
- **Dispersión por modo de polarización (*Polarization Mode Dispersion PMD*):** esta dispersión ocurre cuando en los procesos de fabricación las fibras son ligeramente elípticas, haciendo que cada modo de polarización presente una constante de propagación distinta, es decir, las fibras son birrefringentes, y cómo en cada modo se viaja a una velocidad distinta, se genera una dispersión intermodal. Este fenómeno es poco significativo frente a las otras dispersiones ya presentadas para tasas de transmisión inferiores a decenas de Gbps [23].
- **No linealidades:** debido al aumento en la potencia de transmisión se hace más significativa la generación de nuevos armónicos o interacciones entre las diferentes longitudes de onda que viajan a través de la fibra, produciendo distorsión y mezcla de símbolos, lo que a su vez disminuye la calidad de la señal y aumenta la Tasa de Errores de Bit (*Bit Error Rate*, BER). Los principales efectos no lineales que actúan en un pulso

que viaja a través de la fibra óptica son la dispersión estimulada (que es de dos tipos: Brillouin y Raman) y el efecto Kerr (que se produce debido a la relación de dependencia existente entre el índice de refracción y la intensidad de la luz). A su vez el efecto Kerr se manifiesta a través de tres formas: modulación de auto-fase (*Self-Phase Modulation*, SPM), modulación de fase cruzada (*Cross-Phase Modulation*, XPM), y mezcla de cuatro ondas (*Four-Wave Mixing*, FWM).

- **Dispersión estimulada Brillouin:** genera transferencia de potencia de la señal que se propaga en dirección contraria a la señal incidente en otras longitudes de onda, este efecto se incrementa cuando la potencia de transmisión supera la potencia denominada potencia de umbral  $P_B^{th}$ , para compensar este efecto, en los sistemas con amplificadores se busca aislar las señales reflejadas [20], [36], [55].
  - **Dispersión estimulada Raman:** genera transferencia de potencia en la misma dirección de la señal que se propaga desde una longitud de onda menor a una longitud de onda mayor, este efecto es tres veces más pequeño que el de la dispersión estimulada Brillouin, por lo cual muchas veces no se toma en cuenta, pero puede causar interferencia cuando se trabaja con varias longitudes de onda y es útil en algunos casos para lograr la amplificación óptica, al transmitir potencia desde una longitud de onda que no transporta información a otra de mayor valor que si lo hace [20], [36], [55].
  - **Modulación de auto-fase (*Self-Phase Modulation*, SPM):** genera un cambio en el índice de refracción en el canal óptico y distorsión en el pulso transmitido debido al cambio en la intensidad de energía en el canal óptico [3], [20], [55].
  - **Modulación de fase cruzada (*Cross-Phase Modulation*, XPM):** genera un cambio en los índices de refracción de los canales adyacentes debido a la variación de amplitud en el canal y por lo tanto distorsión en los pulsos transmitidos, su efecto se mitiga ampliando la separación entre canales adyacentes [3], [20], [55].
  - **Mezcla de cuarta onda (*Four-Wave Mixing*, FWM):** genera una mezcla entre las longitudes de onda, debido a la interacción entre los canales y la dispersión cromática en un sistema multi canal y por lo tanto la mezcla de las longitudes de onda [3], [20], [55].
- **Birrefringencia:** debido a pérdidas en la geometría circular del núcleo de la fibra por esfuerzos en el proceso de fabricación, instalación o cambios de temperatura, los índices de refracción de los ejes transversales de la fibra son diferentes, por lo cual la señal se comporta como dos ondas independientes, donde cada una viaja a una velocidad diferente, este fenómeno genera un ensanchamiento de los pulsos, es decir PMD, e interferencia entre símbolos cuando se transmiten señales digitales, limitando

la tasa máxima de bits, la longitud de la fibra y aumentando la BER. Para compensar este efecto suelen utilizarse fibras y arreglos con alta birrefringencia (*Polarization Maintaining Highly Birefringent*, PM Hi-Bi) [58]–[60].

A continuación en la Figura 10 se puede observar como un pulso (azul) transportado a través de un canal óptico con una longitud de onda de 1550 nm,  $\beta_2 = -21.6ps * nm/km$ ,  $\beta_3 = 0.117ps * nm/km$ , una potencia de 1 mW, a una distancia de 1 Km (señal verde) se ve afectado por pérdida de intensidad (atenuación), ensanchamiento (dispersión) y el efecto Kerr.

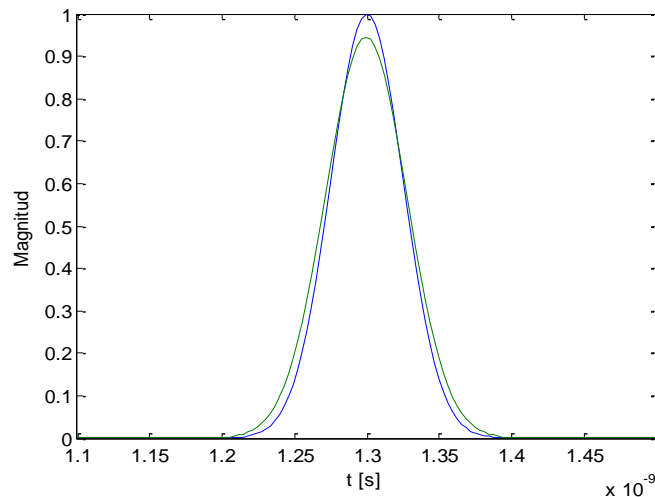


Figura 10 Atenuación y dispersión y efecto Kerr al transmitir un pulso a través de una fibra óptica

El modelo de canal óptico que se desarrolló contempla los fenómenos anteriormente descritos: atenuación, dispersión y efecto Kerr y una fuente de ruido blanco Gaussiano a la que se le puede modificar su relación señal a ruido (SNR por sus siglas en inglés.).

## 2.8. TERCERA ETAPA DEL MODELO: CANAL ÓPTICO

El análisis de la literatura permite que a partir de las ecuaciones de Maxwell, se pueda llegar a la Ecuación No Lineal de Schrödinger (*Non linear Schrödinger Equation*, NLSE) para modelar la fibra óptica y simular la propagación de señales a través de ella, dado que la NLSE considera los efectos de la atenuación, la dispersión cromática y el efecto Kerr [3], [20], [61], [62].

Cómo punto de partida para el análisis del canal óptico se utiliza la ecuación de NLSE simplificada, ver Ec. 17.

$$\frac{\partial \bar{A}}{\partial z} + j \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 \bar{A}}{\partial t^2} - j\gamma |\bar{A}|^2 \bar{A} + \frac{\alpha}{2} \bar{A} = 0 \quad \text{Ec. 17}$$

El segundo término de la ecuación representa la dispersión de segundo orden, el tercer término representa el efecto Kerr y el cuarto término representa la atenuación lineal.

Debido a que esta ecuación considera efectos lineales y no lineales que ocurren en el canal óptico suele resolverse utilizando técnicas numéricas, entre las cuales, la más utilizada es el método de *Split Step Fourier* (SSF). Utilizar este tipo de técnicas para este caso permite incluir la mayor cantidad de aspectos que afectan el canal óptico, logrando una representación bastante aproximada del modelo de un canal óptico real [3], [20], [63].

Para solucionar numéricamente la NLSE se debe dividir en dos componentes, uno lineal y otro no lineal y se debe resolver en forma independiente. Entonces la solución utilizando el método de SSF se desarrolla en dos partes, una lineal y la otra no lineal. La parte lineal se resuelve en el dominio de la frecuencia y la parte no lineal en el dominio del tiempo.

La Ec. 17 se puede expresar como:

$$\frac{\partial A(z, t)}{\partial z} = (L + N)A(z, t) \quad \text{Ec. 18}$$

donde el operador lineal es  $L = -\frac{\alpha}{2} - \frac{j}{2}\beta_2 \frac{\partial^2}{\partial z^2}$  y el operador no lineal es  $N = j\gamma |A(z, t)|^2$ .

A partir de la Ec. 17 puede calcularse la envolvente del campo en la posición  $z + \Delta z$ , que está dada por la siguiente ecuación:

$$A(z + \Delta z, t) = e^{(\Delta z(L+N))} A(z, t) \quad \text{Ec. 19}$$

$$A(z + \Delta z, t) = e^{(\Delta z L)} e^{(\Delta z N)} A(z, t) \quad \text{Ec. 20}$$

La Ec. 20 sugiere que  $A(z + \Delta z, t)$  se puede calcular mediante la aplicación de los dos operadores de forma independiente, siendo esta la solución *Split-step Fourier*. Si  $\Delta z$  es suficientemente pequeño, se asume que los efectos lineal y no lineal actúan en forma independiente en  $\Delta z$ . Para hallar la parte no lineal se hace una transformada inversa de Fourier incluyendo un cambio de variable por medio de cuadratura gaussiana:

$$A(z + \Delta z, t) \approx e^{\left(\frac{\Delta z L}{2}\right)} e^{\left(\int_z^{z+\Delta z} N(\hat{z}) d\hat{z}\right)} e^{\left(\frac{\Delta z L}{2}\right)} A(z, t) \quad \text{Ec. 21}$$

La Ec. 21 se conoce como la solución simetrizada. El operador no lineal en la ecuación anterior se aproxima a [20]:

$$\int_z^{z+\Delta z} N(\hat{z})d\hat{z} \approx \frac{\Delta z}{2} [N(z) + N(z + \Delta z)] \quad \text{Ec. 22}$$

El cálculo de  $\Delta z$  se realiza conociendo el máximo desplazamiento en fase  $\phi_{max}$  permitido y se obtiene a partir de la ecuación  $\phi_{max} = \gamma |A(z_{ph}, t_{ph})|^2 \Delta z$ , en sistemas de comunicación estándar se asume  $\phi_{max} = 0.05$  radianes, con lo que puede calcularse  $\Delta z$  para un enlace determinado.

El error, información fundamental para la validación del método, se calcula entre dos iteraciones consecutivas de la siguiente forma:

$$E_x = |\bar{A}_{k+1} - \bar{A}_k| \quad \text{Ec. 23}$$

A continuación, en la Figura 11 se presenta el diagrama de flujo que permite simular una fibra óptica teniendo en cuenta la atenuación y dispersión a partir de la NLSE mediante el método de SSF simétrico.

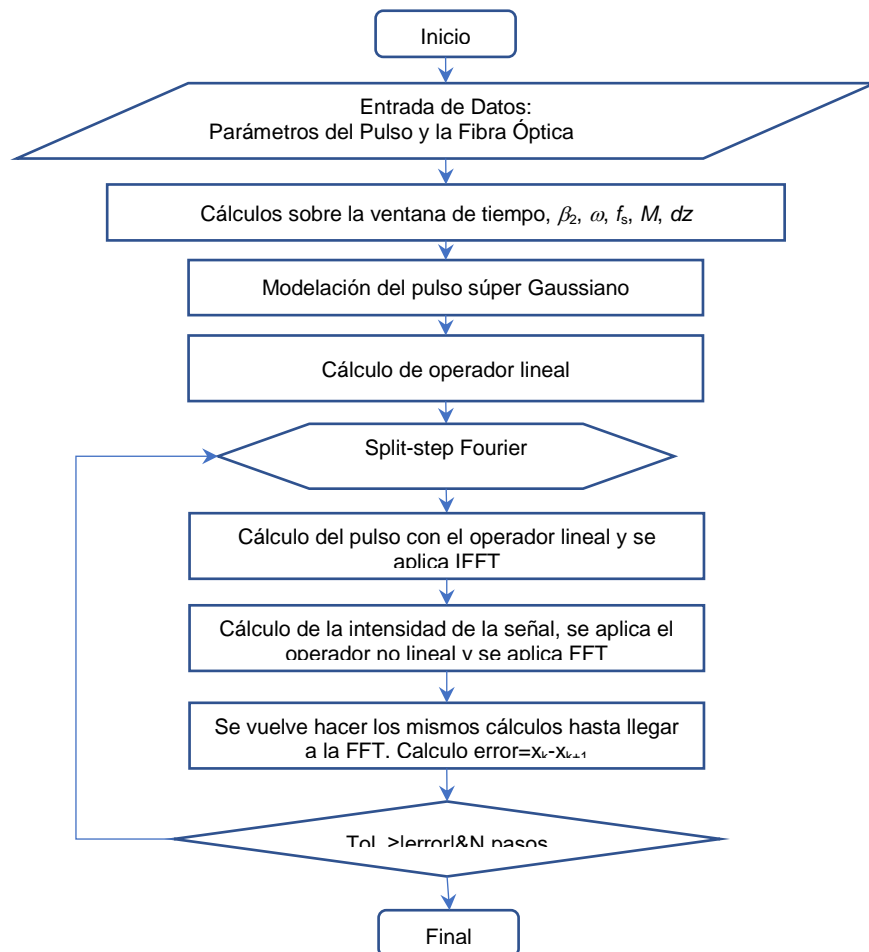


Figura 11 Diagrama del método de *Split-step Fourier*

En el ANEXO 1: MÉTODO DE *SPLIT STEP FOURIER* PARA LA SOLUCIÓN DE LA NLSE se presenta la secuencia de pasos para resolver la NLSE empleando el método SSF simétrico.

### 2.8.1. Transmisión en el canal óptico

A continuación, se emplea el modelo de la fibra óptica a través de la NLSE haciendo una solución numérica con el método SSF. Este método permite simular el paso de la señal a través de la fibra óptica y la incorporación de los efectos lineales y no lineales descritos anteriormente sobre la misma, finalmente la señal resultante corresponde a lo que se recibiría en un receptor óptico.

La señal de entrada a la fibra es la señal modulada en radio frecuencia  $f_{RADIO}(t)$ .

En este punto del sistema es en el que se puede tomar la decisión de realizar la modulación de amplitud óptica o modulación de fase óptica; lo que consiste en registrar a la entrada de la fibra la señal modulada en radio frecuencia o aplicar esta última señal en la fase utilizando la Ec. 24, en la sección 2.9.9 Errores en las portadoras de datos se presentan los resultados de la modulación en fase óptica, donde se puede observar que para el sistema desarrollado esta modulación no es efectiva dada la cantidad de errores que se generan durante la transmisión para todas las distancias de transmisión analizadas. Es así como el sistema desarrollado utiliza modulación en amplitud óptica.

$$f_{FASE}(t) = e^{j \frac{\pi}{V_{pi}} f_{RADIO}(t)} \quad V_{pi} = 4 \quad \text{Ec. 24}$$

El tamaño del paso  $M$  para resolver la NLSE empleando el método numérico se calcula de la siguiente manera:

$$M = \text{redondear} \left( \frac{\text{Distancia de transmisión}}{5 \cdot 10^{-3} / \text{gamma}} \right). \quad \text{Ec. 25}$$

La constante  $5 \cdot 10^{-3}$  permite que el paso calculado garantice una convergencia del método de SSF.

A continuación, se observan la señal recibida en el dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia después de aplicar el modelo del canal óptico

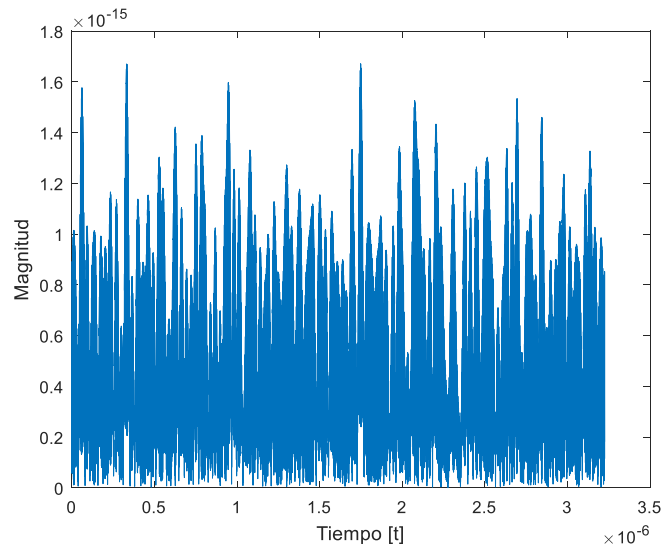


Figura 12 Señal recibida luego del canal óptico en el tiempo

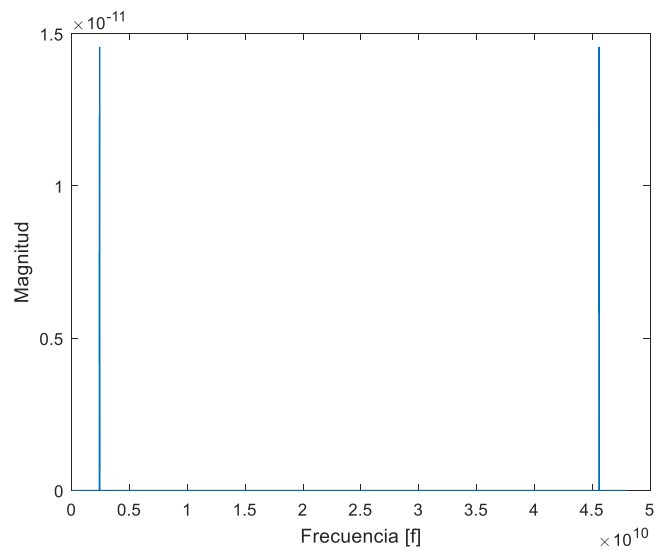


Figura 13 Señal recibida luego del canal óptico en la frecuencia

La Figura 13 representa la señal recibida en RF en el dominio del tiempo, figura que podría no ser muy representativa, sin embargo, al analizar el espectro de frecuencia de la señal recibida, se puede observar que al compararla con la Figura 8 la señal recibida se comporta de forma similar a la señal transmitida; la resultante de la modulación en radio sobre fibra y que el efecto del canal óptico sobre la misma se debe analizar con unos deltas de frecuencia inferiores.

El último paso en el proceso de la transmisión a través del canal óptico es la adición del ruido blanco Gaussiano (AWGN), este corresponde a una señal aleatoria con



representación equitativa en todo el espectro de frecuencia, que representa la contaminación por ruido. En este paso del modelo desarrollado se utiliza la función de Matlab  $Y = awgn(X, SNR)$  que permite adicionar a la señal recibida en el dominio del tiempo una señal de ruido que mantiene relación señal a ruido (*Signal to Noise Ratio*, SNR) en un valor definido de dB, haciendo así el modelo más realista para la generación y transmisión de señales a través de fibra óptica, incluyendo los efectos de atenuación, dispersión y efecto Kerr, utilizando OFDM óptico y radio sobre fibra.

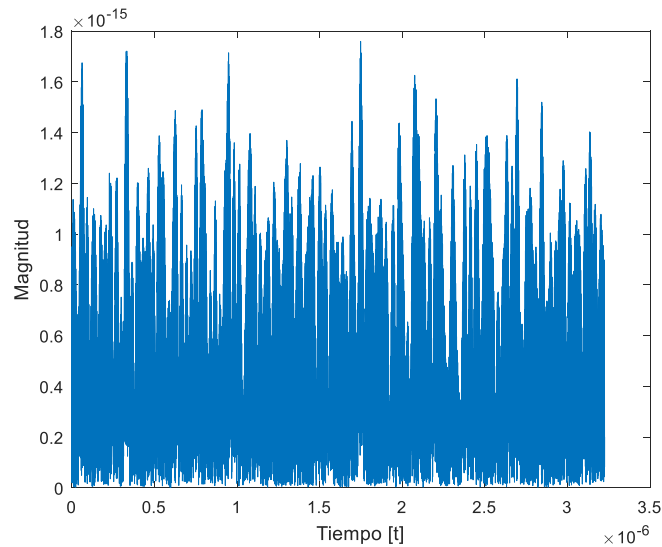


Figura 14 Señal recibida con Ruido Blanco Gaussiano en el tiempo

La señal resultante corresponde a una señal que contiene valores aleatorios de ruido blanco, tal como se puede observar en la Figura 14. El propósito de esta adición es poder analizar y compensar el ruido captado en una simulación del modelo desarrollado que se acerca a la realidad.

## 2.9. CUARTA ETAPA: RECUPERACIÓN Y TRATAMIENTO DE SEÑAL EN EL RECEPTOR

Una vez la señal llega al receptor, se extraen los datos, previamente sincronizados y se realizan los procedimientos complementarios a los descritos y desarrollados en las etapas anteriores de la simulación. Esta etapa del modelo permite, entre otros, identificar los errores en la recepción y aplicar las técnicas asociadas a las estrategias de compensación de errores propuestas: la adición de portadoras piloto, la adición del prefijo cíclico, y la aplicación del *Back Propagation*.

El modelo desarrollado permite seleccionar cual o cuales de las estrategias de compensación de errores se pueden aplicar, pero con propósitos ilustrativos en esta etapa se utilizan los tres propuestos.

Además, se observa una notoria disminución de la potencia debido a los efectos de la transmisión y el ruido del sistema; sin embargo, se parte del supuesto de que la señal es recibida y puede ser procesada por el sistema, ya que el propósito de este sistema no está centrado en la potencia de recepción, si no en la compensación de los efectos de propagación al transmitir una secuencia de bits a través de fibra óptica utilizando OFDM óptico y Radio Sobre Fibra.

### 2.9.1. Compensación digital *Back Propagation*

El principal método de compensación digital empleado en este trabajo se denomina *Back Propagation*. Este método de compensación emplea el mismo modelo de la fibra óptica, la NLSE, y consiste en propagar a la señal hacia atrás, como si se devolviera a través de la fibra óptica. Para lograr este efecto los parámetros de dispersión y no linealidad de la fibra se insertan negados en el método SSF. La entrada al compensador es la señal que se recibe en el receptor, es decir, la señal resultante de pasar por la fibra óptica y añadirle ruido blanco Gaussiano.

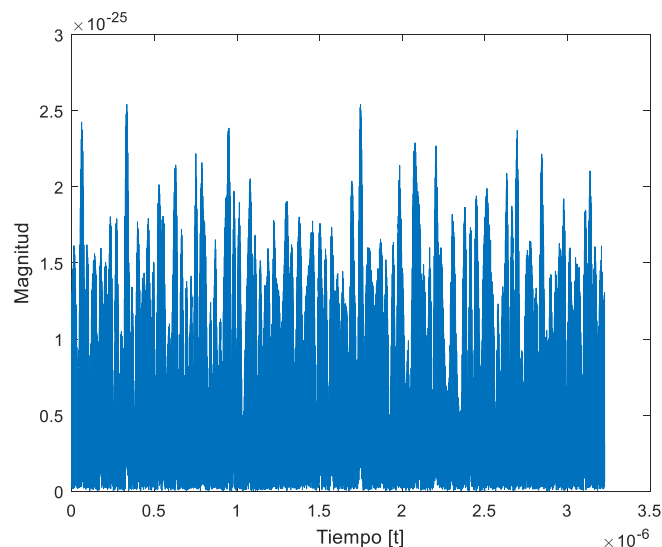


Figura 15 Señal resultante de la aplicación de Back Propagation en el tiempo

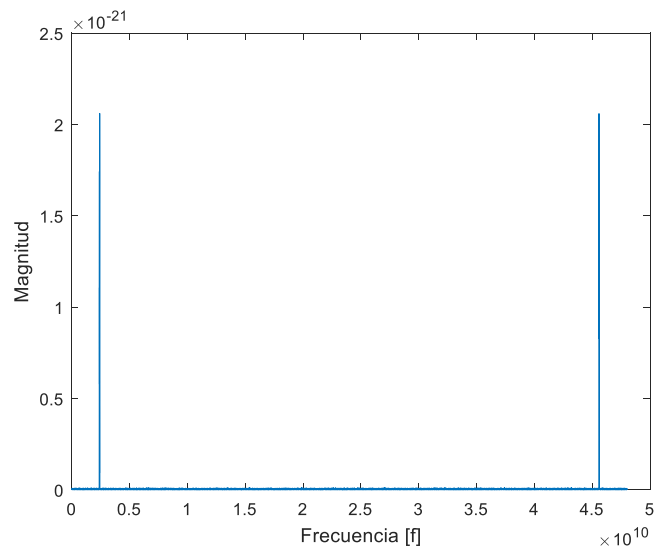


Figura 16 Señal ecualizada al aplicar Back Propagation en la frecuencia

La principal diferencia entre la señal recibida con adición de ruido y la señal resultante de la aplicación del método *Back Propagation* radica en la magnitud de la señal, pues su forma es similar en ambos casos, tal y como se puede observar en la Figura 15 que corresponde a la señal resultante en el dominio de tiempo e igual que otras figuras en el dominio del tiempo suele no ser muy representativa y en la Figura 16 que representa el dominio del tiempo de esta señal.

### 2.9.2. Demodulación de señal de RF – conversión a banda base

Debido a que las señales ya han salido de la fibra óptica, en este paso, se demodula la señal en radio frecuencia, convirtiendo las señales a banda base utilizando señales exponenciales complejas para lograrlo.

La señal resultante, que se presenta en la Figura 17 corresponde a la señal demodulada en el dominio del tiempo, esta señal tiene una duración mayor a la señal original debido al prefijo cíclico, el cual será retirado en el próximo paso.

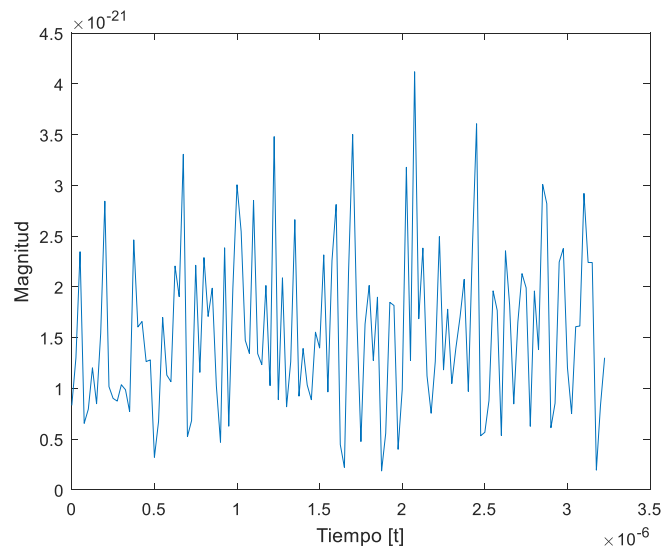


Figura 17 Señal ecualizada banda base en el tiempo

### 2.9.3. Supresión del prefijo cíclico

En este paso se eliminan las componentes iniciales del símbolo que corresponden a la repetición del final del símbolo original, incorporadas para protección frente a la interferencia entre símbolos.

Para el caso específico del sistema modelado, la eliminación del prefijo cíclico se hace teniendo en cuenta las posiciones adicionadas en el proceso de generación del símbolo, es decir, se retiran los 2 componentes que se adicionaron al principio de este y que corresponden a 2 componentes del final de la señal construida, ubicadas en la misma posición tanto en los datos recibidos, como en los datos generados, volviendo a convertir al símbolo al tamaño original.

La señal resultante, que se presenta en la Figura 18 corresponde a la señal de la etapa anterior con una duración menor, lo que se logra, como se ha descrito eliminando dos componentes de tiempo adicionadas como estrategia para la compensación de errores debidos principalmente a la interferencia Inter simbólica

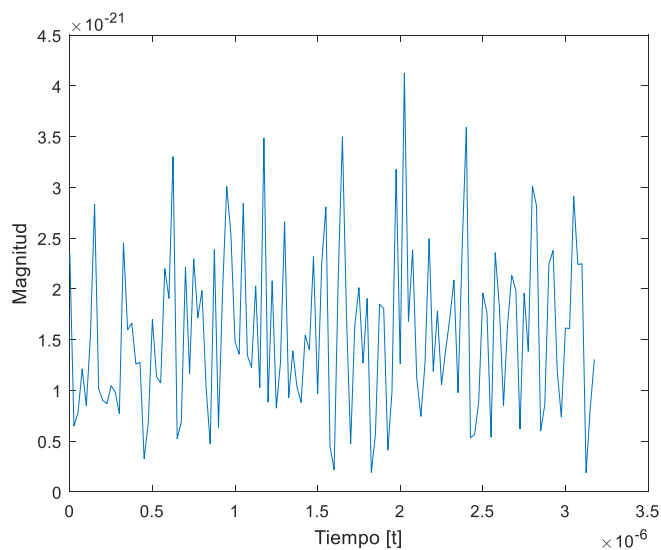


Figura 18 Señal ecualizada sin Prefijo Cíclico en el tiempo

#### 2.9.4. Transformada rápida de Fourier

Se aplica la transformada rápida de Fourier para quitar la ortogonalidad entre los símbolos, esta transformación permitirá trabajar con las portadoras de datos y pilotos para la identificación y compensación de errores.

La transformación se define como [48]:

$$Y_k = \sum_{n=0}^{N-1} \text{Señal } RX \text{ no port piloto} * e^{-i2\pi k \frac{n}{N}} \quad k = 0, \dots, N - 1 \quad \text{Ec. 26}$$

La Figura 19 representa la constelación de datos luego de eliminación del prefijo cíclico, esta figura muestra, que hay cierto grado de error en los datos recibidos pues los valores de las diferentes portadoras están ligeramente descentrados.

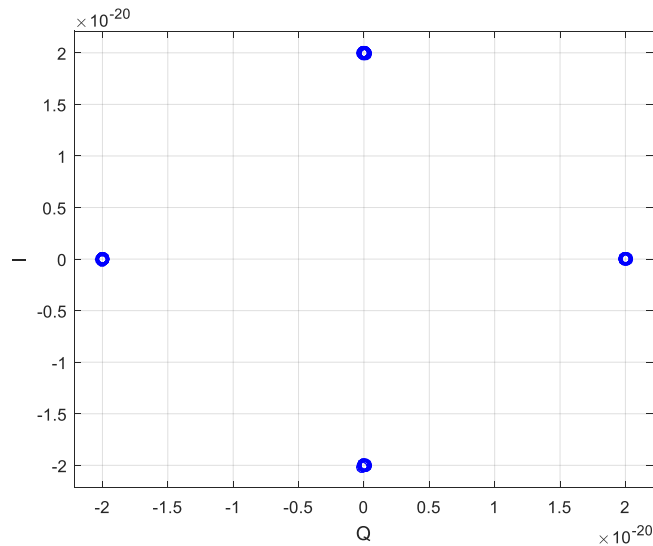


Figura 19 Constelación de datos luego de aplicar la FFT

### 2.9.5. Ecuación utilizando las portadoras piloto

Se realiza una ecuación de la señal recibida a partir de la información encontrada en las portadoras piloto, esta ecuación equivale a la relación entre el valor conocido de las portadoras piloto en la transmisión y el valor de recepción de las portadoras piloto. Con esto se encuentra la respuesta en frecuencia del canal. Se realiza una interpolación de la respuesta obtenida con las portadoras piloto para aplicar esta respuesta a todas las subportadoras en el rango de frecuencia del símbolo.

Para el modelo desarrollado esta interpolación se implementa con la función de Matlab `interp1` que utiliza el valor resultante de la transformada de Fourier, el valor de las portadoras piloto recibidas y el valor de las portadoras piloto originales y realiza lo siguiente.

$$Ecuador = \frac{\text{valor conocido de las portadoras piloto en la transmisión}}{\text{valor recibido de las portadoras piloto}} \quad \text{Ec. 27}$$

Este ecuador se interpola en las frecuencias de todas las portadoras del símbolo y finalmente se recupera la señal multiplicando el símbolo recibido por el ecuador real interpolado para todas las frecuencias.

La Figura 20 representa la constelación de datos luego de la ecuación, en esta se puede observar que el valor de cada uno de los componentes en la constelación se aproxima a

los definidos por el estándar PSK es decir entre -1 y 1 tanto en el eje I, como en el eje Q; también se puede observar que hay cierto grado de error en los datos, pero mejora el comportamiento de los datos en comparación con la figura anterior y se logra compensar la potencia de señal recibida.

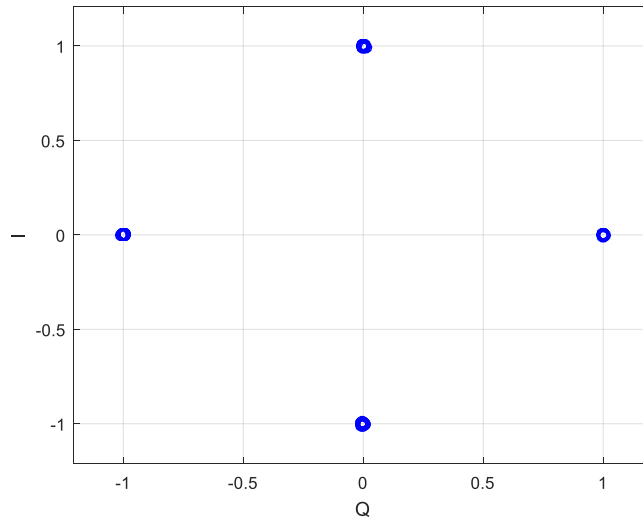


Figura 20 Constelación de datos luego de realizar la ecualización a partir de la información de las portadoras piloto

### 2.9.6. Demodulación digital de la señal

En este paso se transforman los valores resultantes de la ecualización utilizando la demodulación M-PSK para encontrar el valor de las portadoras piloto y portadoras de datos

$$f_{\text{Símbolo}}(t) = \sqrt{\frac{2E_{\text{port}}}{T_{\text{port}}}} \cos\left(2\pi\theta_0 t - \frac{2\pi(i-1)}{N}\right), \quad i = 1, 2, \dots, N; \quad 0 \leq t \leq T \quad \text{Ec. 28}$$

Donde  $E_{\text{port}}$  es la energía de la portadora a demodular,  $T_{\text{port}}$  su duración y  $\theta_0$  es frecuencia portadora.

En la Figura 21 se pueden observar los datos demodulados, donde se toma la amplitud y fase de cada uno de los elementos que se representan en la constelación de la figura anterior y se convierte a su equivalente decodificado.

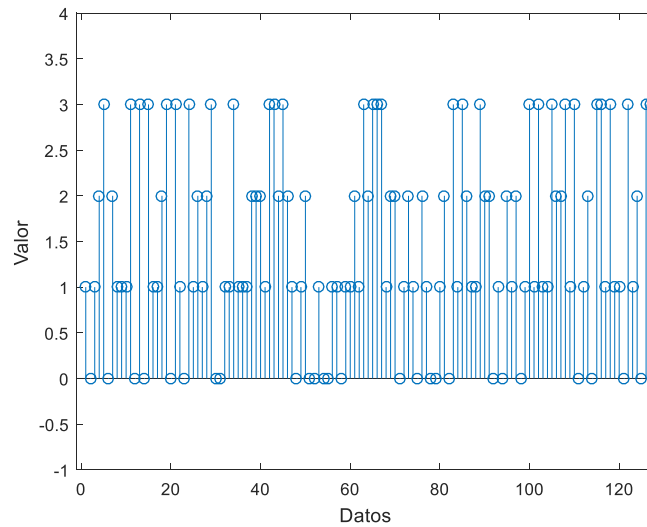


Figura 21 Señal resultante de la demodulación M-PSK

### 2.9.7. Transformación de la cadena de bits de paralelo a serie

En este paso se toman los datos en paralelo, que vienen de las etapas anteriores y se transforman en serie a través de un registro paralelo serie para la siguiente etapa del proceso.

En esta etapa se lee de forma secuencial cada una de las posiciones del registro para ser almacenada en serie, que para este caso vuelve a ser de 128 posiciones, cada una de las cuales corresponde a una portadora bien sea de datos o piloto.

### 2.9.8. Supresión de portadoras piloto

En este paso se eliminan las portadoras piloto, dejando las portadoras de datos en un único vector serie que tiene en cuenta los valores y la posición de cada uno de los datos originales.

Al igual que en el momento de construcción del símbolo, las portadoras piloto se encuentran en las posiciones 1, 9, 17, 25, 33, 41, 49, 57, 72, 80, 88, 96, 104, 112, 120 y 128 del símbolo,



estas 16 portadoras se eliminan, por lo cual el símbolo vuelve a ser de 112 portadoras, lo que se puede observar en la Figura 22.

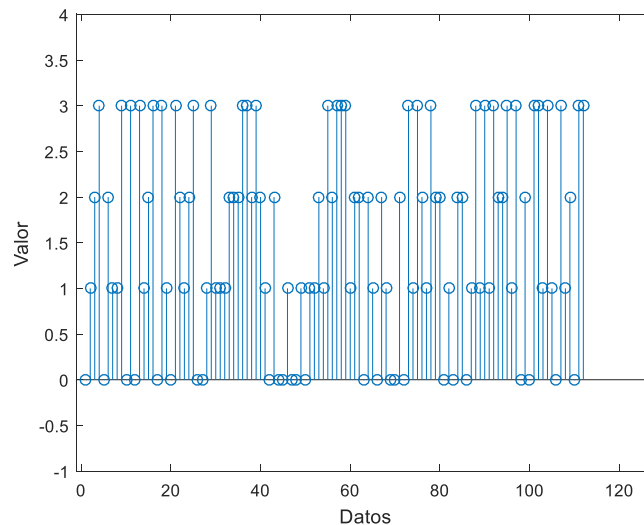


Figura 22 Secuencia de datos recibida luego del tratamiento de señal y supresión de las portadoras piloto

### 2.9.9. Errores en las portadoras de datos

En un sistema de comunicaciones real y en el caso modelado, debido a que al canal óptico se le adicionó Ruido Blanco Gaussiano (AWGN) es posible que se encuentren errores en la recepción de los símbolos OFDM, es por esto por lo que la detección de estos errores se calcula comparando cada una de las portadoras de datos enviada contra cada una de las portadoras de datos recibida.

Teniendo en cuenta que el tratamiento de señal realizado en este modelo consta de tres métodos: *Back Propagation*, prefijo cíclico y ecualización por portadoras piloto, se ha encontrado que en modelo desarrollado y para los parámetros definidos al inicio de este capítulo y al aplicar las tres técnicas de compensación de errores no se encuentran errores en los datos recibidos.

La Figura 23 representa para los 112 datos transmitidos el error símbolo a símbolo que cómo se mencionó anteriormente no genera errores.

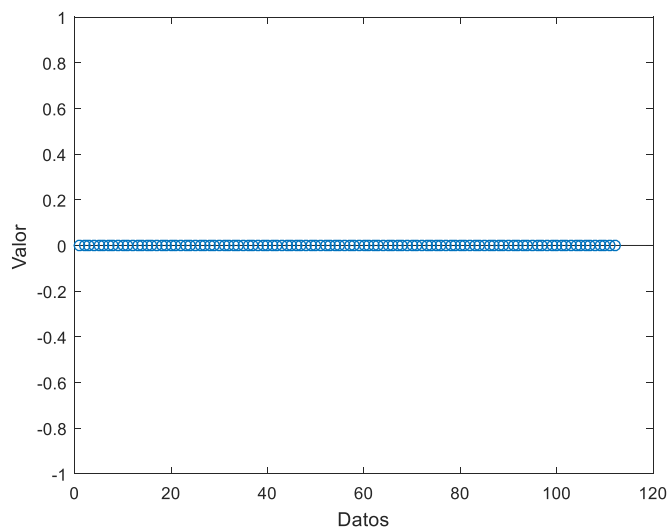


Figura 23 Errores en las portadoras de datos recibidas al realizar modulación de amplitud óptica

Al realizar la modulación de fase óptica se encuentra que en promedio el número de errores del sistema, para todas las distancias analizadas (desde 1 Km hasta 1000 Km) es de aproximadamente 84 bits, con un máximo de 99 y un mínimo de 65, tal y como se puede observar en la Figura 24. Estos resultados evidencian que para el sistema desarrollado la modulación en fase óptica no es eficiente, mientras que la modulación en amplitud óptica permite una transmisión de hasta 1000 Km, al implementar las tres técnicas de procesamiento de señal sin errores.

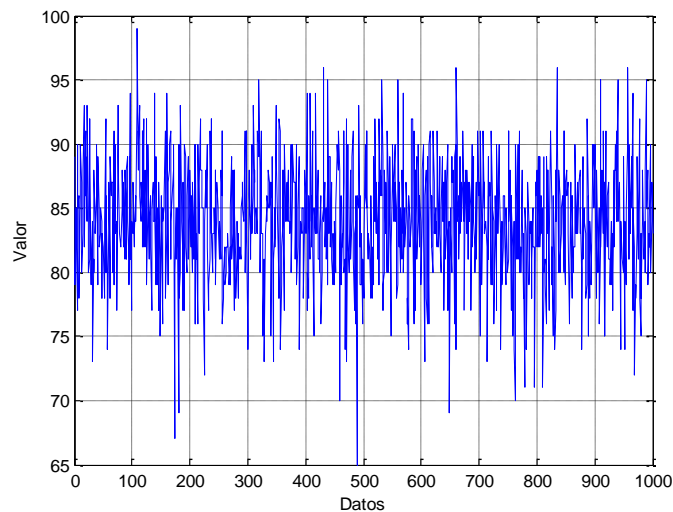


Figura 24 Errores en las portadoras de datos recibidas al realizar modulación de fase

Sin embargo, al cambiar las variables del modelo e implementando o no las tres estrategias de compensación se encuentra que el número de errores aumenta. Esto se desarrolla en

el próximo capítulo 3. CAMPAÑA DE SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS EFECTOS DE PROPAGACIÓN EN LA TRANSMISIÓN DE SEÑALES EN UN CANAL ÓPTICO UTILIZANDO OFDM ÓPTICO Y RADIO SOBRE FIBRA.

### 3. CAMPAÑA DE SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS EFECTOS DE PROPAGACIÓN EN LA TRANSMISIÓN DE SEÑALES EN UN CANAL ÓPTICO UTILIZANDO OFDM ÓPTICO Y RADIO SOBRE FIBRA

El insumo principal para el análisis de los efectos de propagación en la transmisión de OFDM en radio sobre fibra es la realización de una campaña de simulación, en la cual se cambian los diferentes parámetros del sistema para ver su efecto en el modelo desarrollado.

En el ANEXO 2: RESUMEN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN LA CAMPAÑA DE SIMULACIÓN se presentan los resultados obtenidos (distancia máxima sin errores y número promedio de errores obtenidos en una transmisión de 1000 Km) tanto para las variables originales del sistema como para la variación en algunos de los parámetros preestablecidos: frecuencia de radio, ancho de banda, señal a ruido, dispersión, número de portadoras del símbolo, número de símbolos de la modulación PSK y gamma.

Con los parámetros de la simulación ya establecidos se realizan pruebas combinando la inclusión o exclusión de las tres estrategias de procesamiento de señales en la recepción: la adición de portadoras piloto, la adición de prefijo cíclico y la aplicación del *Back Propagation*.

Como ya se ha mencionado anteriormente, los parámetros iniciales de la simulación se presentan en la sección 2.1 PARÁMETROS DE LA SIMULACIÓN y corresponden a tanto a parámetros de una fibra óptica estándar tipo ITU-T-G.652, como a valores típicos de funcionamiento de diferentes tecnologías tipo OFDM óptico, los valores utilizados se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1 Parámetros originales de la simulación

VARIABLE	VALOR	UNIDAD
Distancia	1000	km
Frecuencia de radio	2,4	GHz
Ancho de banda	20	MHz
Señal a Ruido	20	dB
Longitud de onda central	1550	nm
Frecuencia de muestreo	40	MHz
Atenuación	0,2	dB/km
Dispersión	17	ps/nm*km
Número de portadoras del símbolo	128	
Número de símbolos de la modulación PSK	4	
Gamma	0,002	1/(mW*km)

Las primeras pruebas de la campaña de simulación consisten en la combinación de la inclusión o exclusión, en el modelo desarrollado, de las tres estrategias para el procesamiento de señales en el receptor, mientras se conservan los demás parámetros de la simulación, el propósito de estas pruebas es identificar cuales estrategias disminuyen los errores del sistema y sus resultados obtenidos se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2 Campaña de simulación caso típico

PROCESAMIENTO DE SEÑAL APLICADO			ÚLTIMA DISTANCIA EN KM CON ERROR DE PORTADORAS INFERIOR AL 50%	NÚMERO PROMEDIO DE ERRORES
BACK PROPAGATION	PREFIJO CÍCLICO	PORTADORAS PILOTO		
			0	96,613
		X	1000	0
	X		0	96,596
	X	X	1000	0
X			1000	0
X		X	1000	0
X	X		1000	0
X	X	X	1000	0

Al analizar los resultados de la simulación del transporte de una señal en un canal óptico con un ancho de banda de 20MHz a una frecuencia de 2.4 GHz utilizando OFDM óptico y radio sobre fibra a una distancia de 1000 km, con una fibra óptica con atenuación de 0.2 dB/km, dispersión de 17 ps/nm\*km se puede encontrar que las variables que mejoran el desempeño del sistema, es decir, disminuyen drásticamente la cantidad de errores, son el uso de las portadoras piloto, del *Back Propagation* y la aplicación simultánea de estas DOS estrategias.

También se ha podido encontrar que el desempeño del sistema al utilizar únicamente el prefijo cíclico como estrategia para la compensación de errores o al no realizar ningún tratamiento de señales en la recepción en promedio el 86.2% de los datos enviados a lo largo de los 1000 km llegan errados al destino.

Adicionalmente, se encuentra que el desempeño del sistema al utilizar el prefijo cíclico como única estrategia de compensación de errores mejora en un 0.1% en comparación con la no utilización sistemas de compensación de errores en la recepción.

A continuación, la Figura 25, la Figura 26, la Figura 27, Figura 28 y la Figura 29 representan las constelaciones con los datos recibidos a las distancias de 1 Km, 333 Km, 667 Km y 1000 Km, donde se evidencia lo siguiente:

- El efecto de la atenuación, dispersión, efecto Kerr y ruido en la transmisión a medida que se aumenta la distancia.

- El desfase de las señales recibidas principalmente cuando no se utiliza estrategia para la compensación de errores o se utiliza únicamente el prefijo cíclico.
- La dispersión no se hace evidente debido al limitado ancho de banda de la señal transportada.
- La eficiencia en la compensación de los efectos del canal óptico al aplicar como estrategia de compensación de errores las portadoras piloto, el *Back Propagation* y la combinación de las tres (portadoras piloto, prefijo cíclico y *Back Propagation*), logrando para estos últimos 3 casos transmisiones de 1000 Km sin errores.
- Acerca de los efectos observados en estas constelaciones la atenuación y el desfase se hacen evidentes en el caso en el que no se aplican estrategias de compensación de errores y en el caso de la aplicación del prefijo cíclico; el efecto de la atenuación se hace evidente en el caso de la aplicación del *Back Propagation* y el limitado o poco efecto de la atenuación y dispersión se observa en el caso de la aplicación de las portadoras piloto y de las tres estrategias de compensación de errores.
- En todos los casos se evidencia una disminución de la potencia en la recepción a medida que la distancia aumenta, a tal punto de considerarse que estas potencias no superan el umbral mínimo de los receptores, sin embargo, se consideran estos datos con propósitos ilustrativos, pues se pretende analizar el efecto de la propagación para varias distancias. Por otra parte, el único caso donde no se observa disminución de la potencia es en el de la adición de las portadoras piloto, pues la ecualización realizada permite incrementar la potencia de las señales recibidas.
- Adicionalmente debido a que el análisis de constelaciones se realiza en la recepción, antes de realizar la demodulación PSK y ya se han aplicado las estrategias de compensación de errores se observa que en alguna medida estas ayudan disminuir los efectos de la dispersión, que, para las distancias analizadas, se esperaba fueran mayores.

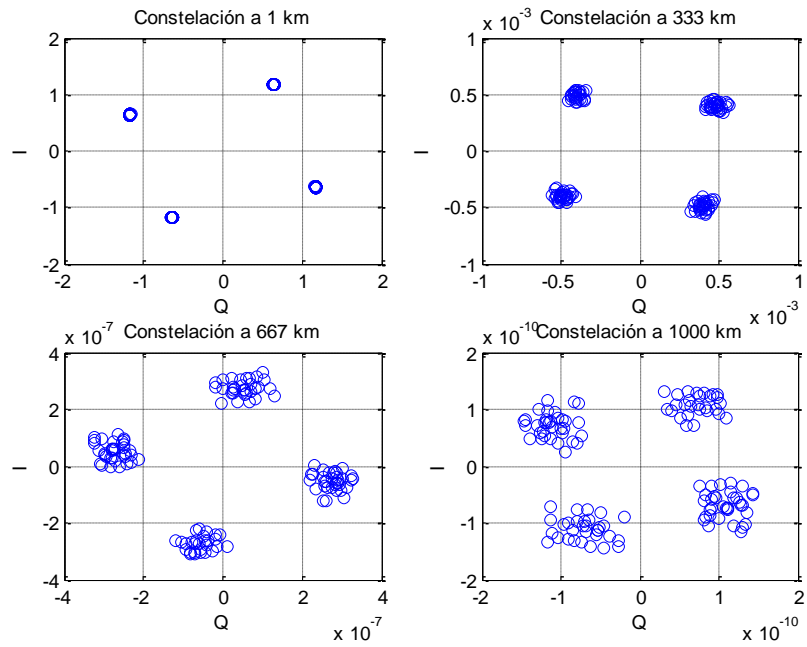


Figura 25 Constelación de datos recibidos a 1, 333, 666 y 100 Km para el sistema desarrollado sin la utilización de estrategias para la compensación de errores.

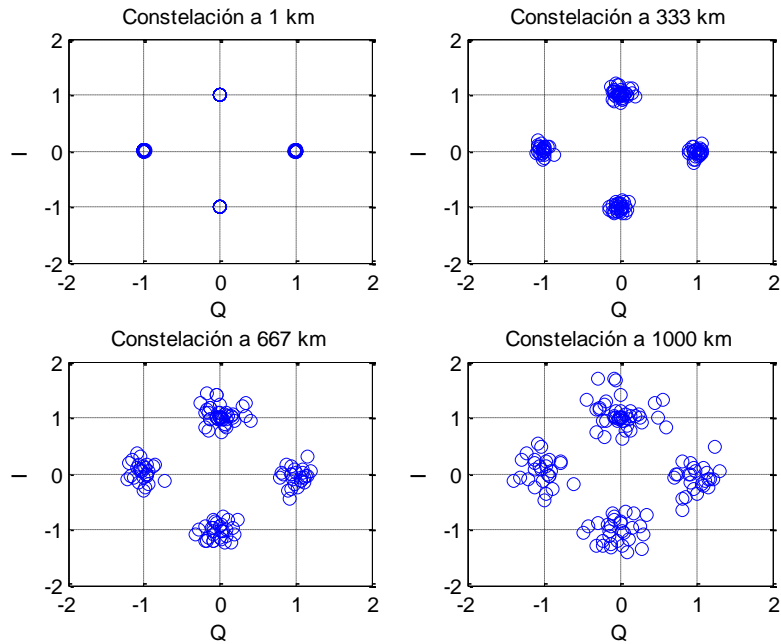


Figura 26 Constelación de datos recibidos a 1, 333, 666 y 100 Km para el sistema desarrollado utilizando la estrategia de portadoras piloto para la compensación de errores.

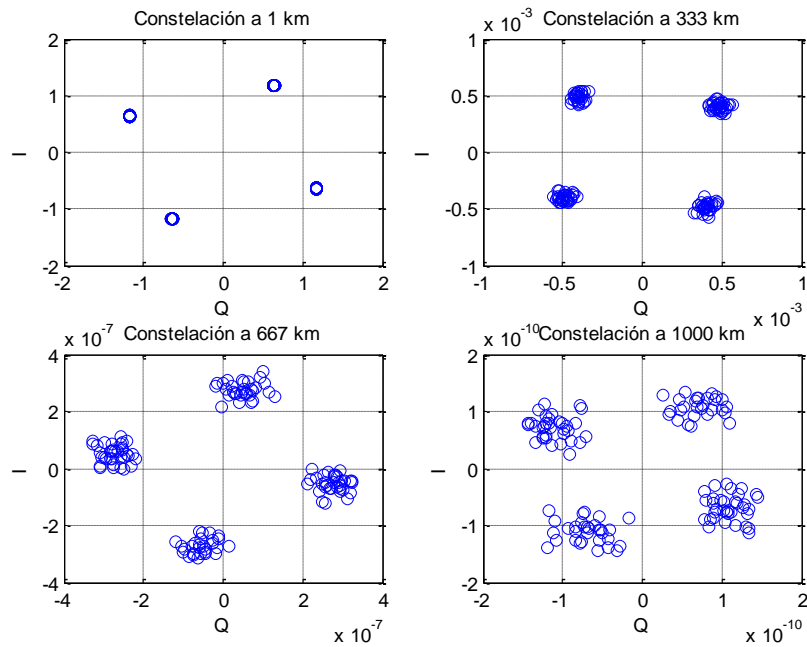


Figura 27 Constelación de datos recibidos a 1, 333, 666 y 100 Km para el sistema desarrollado utilizando la estrategia de prefijo cíclico para la compensación de errores.

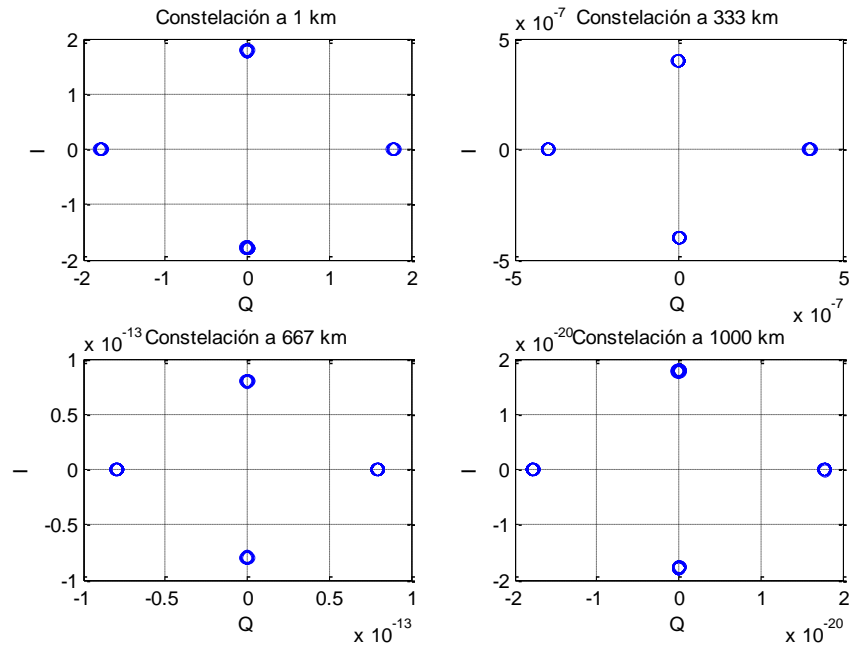


Figura 28 Constelación de datos recibidos a 1, 333, 666 y 100 Km para el sistema desarrollado utilizando la estrategia de *Back Propagation* para la compensación de errores



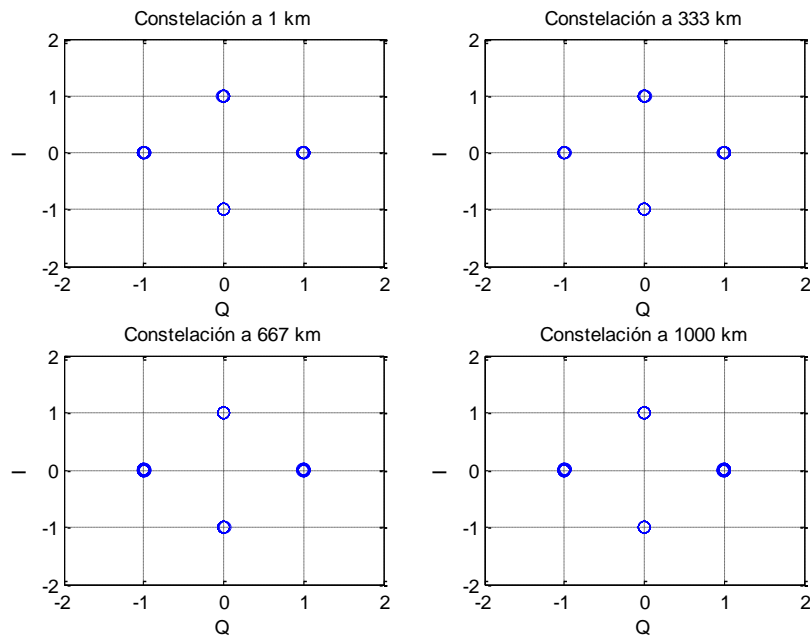


Figura 29 Constelación de datos recibidos a 1, 333, 666 y 100 Km para el sistema desarrollado utilizando las tres estrategias para la compensación de errores: portadoras piloto, prefijo cíclico y *Back Propagation*.

Estos resultados son esperados, debido a:

- Al realizar el proceso de ecualización en la estrategia de la adición de las portadoras piloto, se logra contrarrestar tanto el efecto de la atenuación, como el desfase pues se ajusta la amplitud de cada portadora en relación con la variación de la potencia entre las portadoras piloto.
- Al realizar el proceso del prefijo cíclico, se busca disminuir la interferencia inter simbólica, lo cual no representa necesariamente aumento en la potencia de la señal o cambio de fase de esta, razón por la cual, la aplicación de esta estrategia en el sistema desarrollado no es significativa en cuanto a la compensación de errores, teniendo en cuenta la transmisión de un único símbolo.
- Al aplicar el modelo del canal óptico inverso en la estrategia de la aplicación del *Back Propagation* se logra contrarrestar el efecto del desfase, aunque no se logra incrementar la potencia de la señal.
- Al aplicar las tres estrategias de forma simultánea se logra un mejor desempeño del sistema, pues se disminuye o elimina el desfase y se logra incrementar la potencia de la señal.

Luego de la realización de las primeras simulaciones se continua con la realización de pruebas en las que se cambian las variables principales del sistema, los valores de las variables modificadas se presentan a continuación en la Tabla 3

Tabla 3 Variables cambiadas durante la campaña de simulación

Variable	Valores	Unidad
Frecuencia de radio	2,4 5	GHz
Ancho de banda	20 10 30	MHz
Señal a Ruido	20 10 5 0	dB
Dispersión	17 2 -2	ps/nm*km
Número de portadoras del símbolo	128 256 512	
Número de símbolos de la modulación PSK	4 8 16 32 64	
Gamma	0,002 0,001 0,004	1/(mW*km)

Es así como en los resultados de la campaña de simulación, que se encuentran en el ANEXO 2: RESUMEN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN LA CAMPAÑA DE SIMULACIÓN, se encontró que los cambios más significativos en el comportamiento del sistema que afectan el desempeño de los métodos de compensación de errores, al variar los parámetros de la simulación, corresponden a el número de símbolos de la modulación digital M-PSK, pues al aumentar el número de los mismos, la probabilidad de error de símbolo debido a la transmisión aumenta y que pese a la implementación de las estrategias de compensación de errores el sistema pierde exactitud a medida que se aumenta la distancia de transmisión, esto implica que a mayor número de símbolos de la modulación digital M-PSK, menor distancia a la que se encuentran errores en los datos transmitidos y mayor número promedio de errores encontrados, cómo se puede observar en la Figura 30.

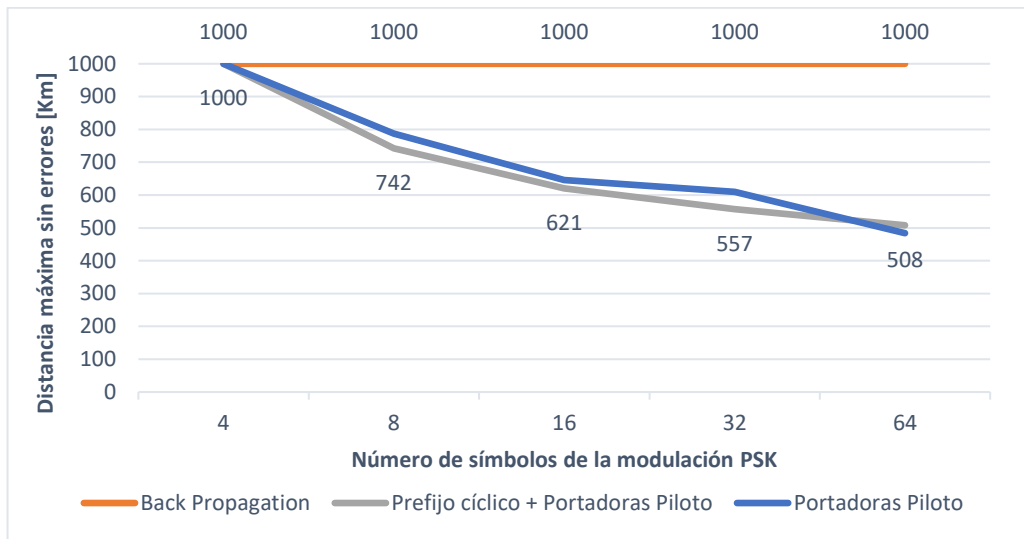


Figura 30 Distancia máxima sin errores vs número de símbolos de la modulación digital M-PSK.

Otro resultado identificado es, que al utilizar como método de compensación de errores la adición de portadoras piloto y compararla con la adición de portadoras piloto más el prefijo cíclico, la distancia máxima sin errores del sistema disminuye hasta un 10% y el número promedio de errores aumenta en casi igual medida, este último resultado se puede observar en la Figura 31.

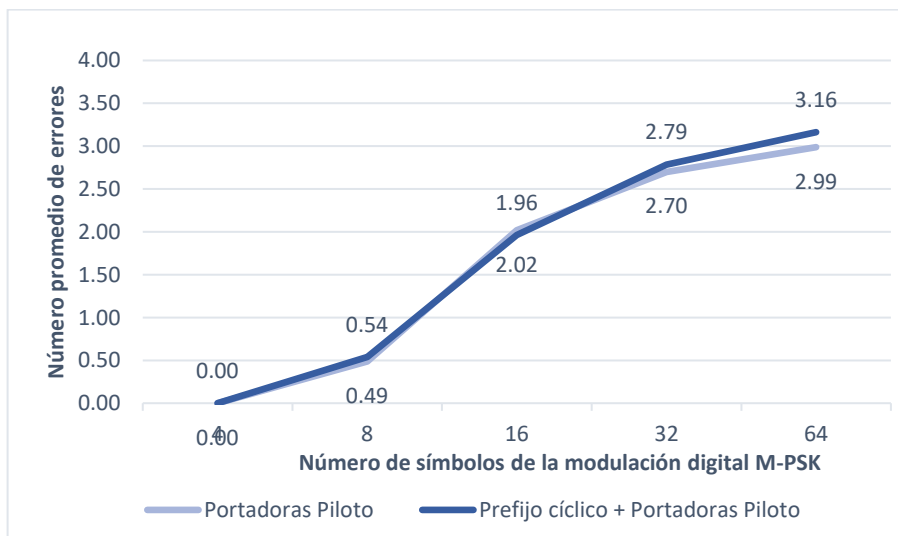


Figura 31 Número promedio de errores vs número de símbolos de la modulación digital M-PSK

Cabe resaltar que sin importar la variable del sistema a cambiar se ha encontrado que al aplicar las tres estrategias de compensación de errores permiten realizar una transmisión de hasta 1000 Km sin errores.

Dado que los efectos del canal óptico no cambian la frecuencia de transmisión, pero si afectan de forma significativa la fase de las señales transportadas se hace necesario analizar el cambio de fase en el sistema desarrollado con el incremento de la distancia. Con este propósito se analiza la fase de cada una de las portadoras del sistema en la transmisión y al realizar la recuperación de las portadoras en la recepción.

El análisis de fase desarrollado se realiza en la etapa de modulación digital de los símbolos tanto para la transmisión como para la recepción, (ver 2.4.5 Modulación digital de los símbolos). Luego de la modulación digital de la señal, cada una de las portadoras es representada por una combinación de amplitud y fase, por lo cual se compara una a una la fase de las portadoras en la recepción versus su fase en la transmisión para los 1000 Km simulados. Con estos resultados se encuentran los valores de Desfase Promedio para cada distancia.

A continuación se presentan la Figura 32, Figura 33, Figura 34, Figura 35 y Figura 36 donde se observa que el comportamiento del desfase promedio. evidenciándose lo siguiente:

- Para el caso en el que no se aplican estrategias de compensación de errores el desfase promedio varia de forma secuencial a medida que se aumenta la distancia, entre  $0^\circ$  y  $360^\circ$ .
- Para el caso en el que se aplica la estrategia de portadoras piloto se puede observar que el desfase promedio se mantiene cerca de  $0^\circ$ , con un ligero incremento, a medida que aumenta la distancia recorrida hasta los  $2^\circ$  lo que implica que esta estrategia mejora el efecto de desfase del sistema.
- Para el caso en el que se aplica la estrategia de prefijo cíclico, se puede observar que se parece bastante al caso de la no aplicación de estrategias de compensación, es decir, el desfase promedio varia de forma secuencial a medida que se aumenta la distancia, entre  $0^\circ$  y  $360^\circ$ .
- Para el caso en el que se aplica la estrategia de *Back Propagation*, se puede observar que el desfase máximo se mantiene cerca  $0^\circ$ , lo que permite inferir que la aplicación de esta estrategia de compensación mejora significativamente, en comparación con las otras estrategias, el desempeño del sistema.
- Para el caso en el que se aplican las tres estrategias de compensación de errores: portadoras piloto, prefijo cíclico y *Back Propagation*, se puede observar que el desfase máximo se mantiene cerca  $0^\circ$ , lo que permite inferir que la aplicación simultánea de estas estrategias de compensación mejora significativamente el desempeño del sistema.

- Los desfases encontrados son consistentes con los resultados de las constelaciones presentadas anteriormente, donde se puede observar que para el caso en el que no se aplican estrategias de compensación de errores y se aplica el prefijo cíclico las señales sufren con el paso de la distancia un desfase secuencial, mientras que para el caso en el que se aplican portadoras piloto, *Back Propagation* o las tres estrategias de compensación de errores, el desfase del sistema es mínimo.

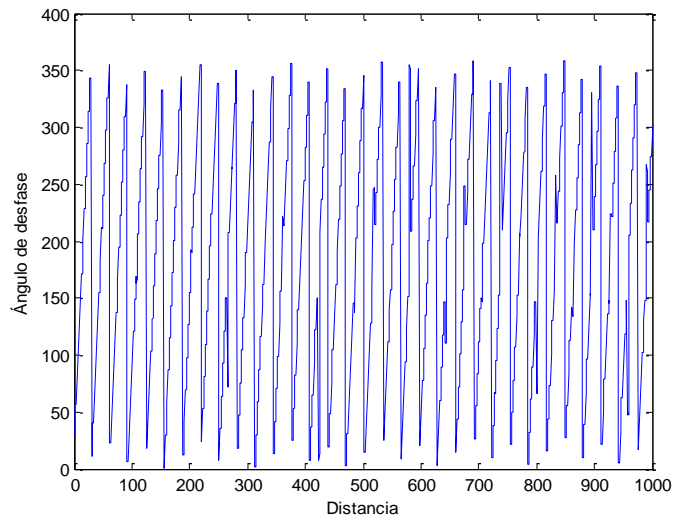


Figura 32 Desfase promedio y máximo para el sistema desarrollado sin la utilización de estrategias para la compensación de errores.

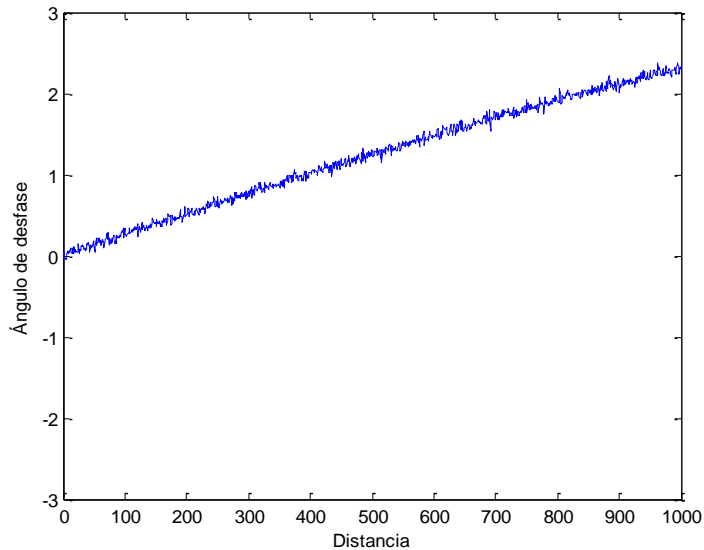


Figura 33 Desfase promedio y máximo para el sistema desarrollado utilizando portadoras piloto como estrategia para la compensación de errores

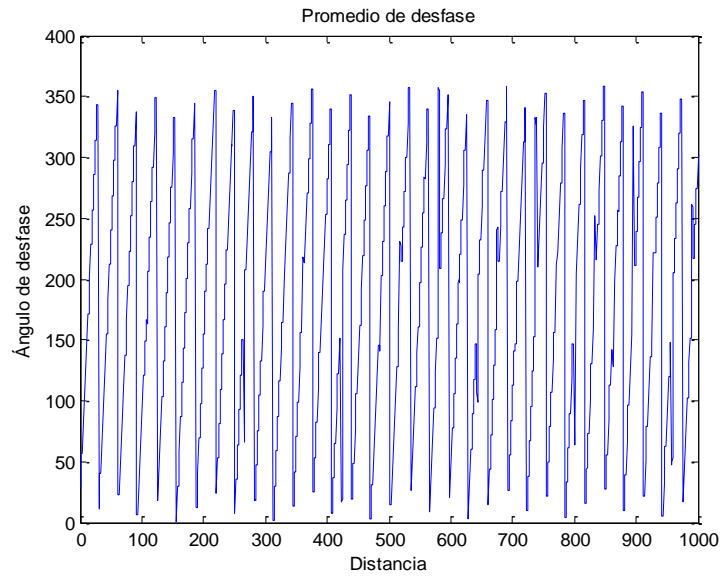


Figura 34 Desfase promedio y máximo para el sistema desarrollado utilizando prefijo cíclico como estrategia para la compensación de errores

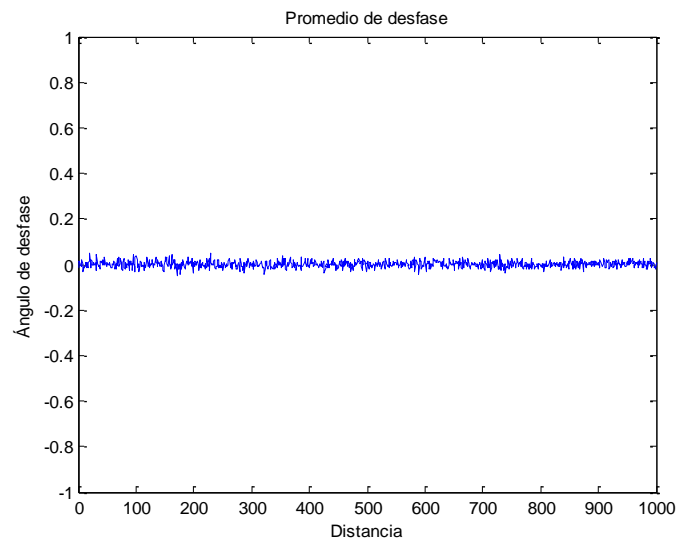


Figura 35 Desfase promedio y máximo para el sistema desarrollado utilizando *Back Propagation* como estrategia para la compensación de errores

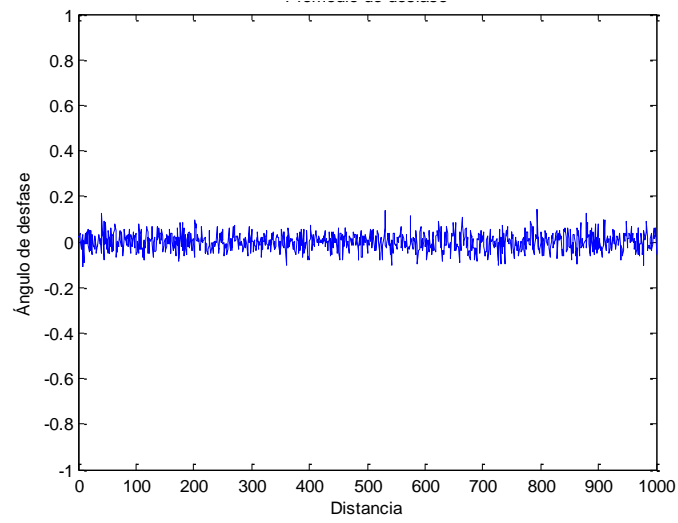


Figura 36 Desfase promedio y máximo para el sistema desarrollado utilizando las tres estrategias para la compensación de errores: portadoras piloto, prefijo cíclico y *Back Propagation*

## 4. CONCLUSIONES

Se desarrolla un algoritmo que fue implementado en el software Matlab, éste incorpora cada una de las etapas de transmisión y recepción de un sistema que permite el transporte de secuencias de bits a través de fibra óptica utilizando OFDM óptico y radio sobre fibra, este sistema incluye los principales efectos del canal óptico: atenuación, dispersión y efectos Kerr, así como también ruido blanco gaussiano y el tratamiento digital de las señales en la recepción para la compensación de errores.

El modelo desarrollado describe matemática y operativamente el comportamiento de cada una de las partes que componen el sistema que utiliza la técnica de OFDM óptico en radio sobre fibra.

El algoritmo permite escoger la implementación de hasta tres estrategias para la compensación de los efectos del canal óptico y del ruido generado durante la transmisión de secuencias de bits a través de fibra óptica utilizando OFDM óptico y radio sobre fibra; estas tres estrategias son: adición de portadoras piloto, adición de prefijo cíclico y aplicación de *Back Propagation*.

El sistema desarrollado también permite la variación de los siguientes parámetros: distancia, frecuencia, ancho de banda de radiofrecuencia, dispersión, relación señal a ruido, número de portadoras del símbolo OFDM, número de símbolos de la modulación digital y gamma.

Durante el proceso de validación de resultados, en un escenario optimista, es decir, al utilizar las variables de simulación ideales, al aplicar las tres estrategias para la compensación de errores y con distancias de transmisión de hasta 1000 km, se logran transmisiones sin errores sin la necesidad de incrementar la potencia de transmisión.

La implementación de la técnica de OFDM óptico y radio sobre fibra permite mejorar los tiempos de desempeño y agilizar los procesos de transmisión cuando estas señales ópticas deben enviarse de forma posterior a través de canales inalámbricos, pues la modulación en radiofrecuencia que incorpora este sistema hace parte del proceso de acondicionamiento de la señal previo a cualquier transmisión inalámbrica.

La campaña de simulación permite evidenciar que la variable que mejora el desempeño del sistema en mayor medida es la aplicación del *Back Propagation*, en segunda instancia la adición de las portadoras piloto y finalmente el prefijo cíclico.



El efecto del prefijo cíclico en el sistema desarrollado no es tan evidente debido a que las pruebas realizadas involucran la transmisión de una única secuencia de datos a transmitir y el prefijo cíclico está diseñado para compensar los errores en sistemas que transmiten múltiples símbolos o secuencias de datos consecutivas.

El incremento en el número de símbolos de la modulación digital M-PSK genera una mayor sensibilidad del algoritmo desarrollado a los errores durante la transmisión, bien sea por la relación señal a ruido o por los efectos del canal, haciendo como caso ideal una la utilización de un número de símbolos de la modulación digital menor o igual a 4.

Los efectos más evidentes del sistema desarrollado son: atenuación y desfase, los cuales se pueden compensar gracias a la utilización de las diferentes estrategias desarrolladas, principalmente la ecualización (relacionada con la adición de las portadoras piloto) para la compensación de la amplitud y la implementación del *Back Propagation* para la compensación del desfase.

Los análisis realizados permiten identificar que las tres estrategias de compensación de errores permiten mejorar el desempeño del sistema de la siguiente manera: la adición de las portadoras piloto permite ajustar la potencia cada una de las componentes de la señal en la recepción, el prefijo cíclico disminuye la interferencia Inter simbólica (que para el sistema desarrollado no es evidente) y la aplicación del *Back Propagation* disminuye el desfase de cada uno de los componentes de la señal en la recepción.

Acerca de los efectos observados en las constelaciones la atenuación y el desfase se hacen evidentes en el caso en el que no se aplican estrategias de compensación de errores y en el caso de la aplicación del prefijo cíclico; el efecto de la atenuación se hace evidente en el caso de la aplicación del *Back Propagation* y el limitado o poco efecto de la atenuación y dispersión se observa en el caso de la aplicación de las portadoras piloto y de las tres estrategias de compensación de errores; este análisis se realiza en la recepción, antes de realizar la demodulación PSK y ya se han aplicado las estrategias de compensación de errores se observa que en alguna medida estas ayudan disminuir los efectos de la dispersión, que, para las distancias analizadas, se esperaba fueran mayores.

Se evidencia una disminución de la potencia en la recepción a medida que la distancia aumenta, a tal punto de considerarse que estas potencias no superan el umbral mínimo de los receptores, sin embargo, se consideran estos datos con propósitos ilustrativos, pues se pretende analizar el efecto de la propagación para varias distancias.

Los desfases encontrados son consistentes con los resultados de las constelaciones presentadas, donde se puede observar que para el caso en el que no se aplican estrategias de compensación de errores y se aplica el prefijo cíclico las señales sufren con el paso de la distancia un desfase secuencial, mientras que para el caso en el que se aplican portadoras piloto, *Back Propagation* o las tres estrategias de compensación de errores, el desfase del sistema es mínimo.

## 5. RECOMENDACIONES

Como proyectos o avances futuros en relación con las temáticas desarrolladas se recomiendan las siguientes estrategias:

- Adicionar al sistema implementado la capacidad de transmitir múltiples símbolos consecutivos.
- Realizar experimentación física del sistema desarrollado y comparar su desempeño con los resultados de las campañas de simulación realizadas.
- Desarrollar estrategias que permitan disminuir la conversión electroóptica durante el proceso de compensación de los efectos del canal óptico y el ruido en sistemas reales para mejorar los tiempos de desempeño del sistema.
- Identificar o desarrollar nuevas estrategias que permitan mejorar el desempeño de técnica de OFDM y radio sobre fibra principalmente en relación con el desfase de las señales.
- Validar el desempeño de los equipos actuales utilizados para la transmisión de sistemas que transportan secuencias de bits a través de fibra óptica utilizando OFDM óptico y radio sobre fibra.
- Adicionar el modelo de canal inalámbrico para desarrollar un sistema que integre e incluya tanto la transmisión óptica, cómo la transmisión inalámbrica.
- Publicación y desarrollo de resultados en temáticas cómo: (a) el análisis constelaciones y desfases, (b) modulación en amplitud óptica y fase óptica y (c) comparación de la modulación digital IQ PSK con QAM.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] R. García Olcina, "Sistema de fabricación de altas prestaciones de redes de difracción de Bragg en fibra y aplicaciones al campo de los sensores ópticos y a los sistemas de comunicaciones ópticas.," Universidad Politécnica de Valencia, 2008.
- [2] J. Pérez Soler, "Coexistencia e integración de comunicaciones inalámbricas en sistemas de transmisión ópticos.," 2009.
- [3] W. Shieh and I. Djordjevic, *OFDM for Optical Communications*. 2010.
- [4] Cisco Inc, "Global consumer internet volume: Cisco Visual Networking Index 2010 – 2015," *Cisco Tech. White Pap.*, 2011.
- [5] AETecno, "260 millones de usuarios de Internet habrá en América Latina para el 2015," *América Economía*, 2011. [Online]. Available: <http://tecno.americaeconomia.com/noticias/260-millones-de-usuarios-de-internet-habra-en-america-latina-para-el-2015>. [Accessed: 25-Jul-2011].
- [6] "Mínimo de banda ancha en Colombia será de 25 Mbps para el 2019," *El Tiempo - Tecnósfera y Cartagena*, 20-Jun-2017.
- [7] K. Kikuchi, "Coherent Optical Communications - History, State of the art Technologies, and Challenges for te Future," *Opto-Electronics Commun. Conf. 2008 2008 Aust. Conf. Opt. Fibre Technol. OECC/ACOFT 2008.*, pp. 14–17, 2008.
- [8] M. de Comunicaciones, "Propuesta de atribución, asignación y valoración de la banda de 3.5 GHz." 2006.
- [9] I. Tafur Monroy, R. Kja, F. Ohman, K. Yvind, and P. Jeppesen, "Distributed fiber raman amplification in long reach PON bidirectional access linksNo Title," *Opt. Fiber Technol.*, vol. 14, no. 1, pp. 41–44, 2008.
- [10] X. Chen and W. Shieh, "Closed-form expressions for nonlinear transmission performance of densely spaced coherent optical OFDM systems," *Opt. Express*, vol. 18, no. 18, pp. 19-039;19-054, 2010.
- [11] A. J. Lowery, "Fiber nonlinearity pre- and post-compensation for long-haul optical links using OFDM.," *Opt. Express*, vol. 15, no. 20, pp. 12965–70, 2007.
- [12] M. E. Mousa-Pasandi and D. V. Plant, "Zero-overhead phase noise compensation via decision-directed phase equalizer for coherent optical OFDM," *Opt. Express*, vol. 18, no. 20, p. 20651, 2010.
- [13] J. Pan and C. H. Cheng, "Nonlinear electrical predistortion and equalization for the

- coherent optical communication system,” *J. Light. Technol.*, vol. 29, no. 18, pp. 2785–2789, 2011.
- [14] C. Yang, F. Yang, and Z. Wang, “Phase noise estimation and mitigation for DCT-based coherent optical OFDM systems,” *Opt. Express*, vol. 17, no. 19, p. 17052, 2009.
- [15] L. B. Y. Du and A. J. Lowery, “Fiber nonlinearity precompensation for long-haul links using direct-detection optical OFDM,” *Opt. Express*, vol. 16, no. 9, p. 6209, 2008.
- [16] W. Shieh, “High Spectral Efficiency Coherent Optical OFDM for 1 Tb/s Ethernet Transport,” *Opt. Fiber Commun. Conf. Natl. Fiber Opt. Eng. Conf.*, 2009.
- [17] W. Qiu *et al.*, “The Nonlinear Impairments due to the Data Correlation among sub-Carriers in Coherent Optical OFDM Systems,” *J. Light. Technol.*, vol. 27, no. 23, pp. 5321–5326, 2009.
- [18] Y. Ma, Q. Yang, Y. Tang, S. Chen, and W. Shieh, “1-Tb/s single-channel coherent optical OFDM transmission with orthogonal-band multiplexing and subwavelength bandwidth access,” *J. Light. Technol.*, vol. 28, no. 4, pp. 308–315, 2010.
- [19] O. B. González Hernandez, “Estudio de la aplicación de técnicas de modulación OFDM para comunicaciones ópticas guiadas en el canal infrarrojo,” Universidad de la Laguna, 2004.
- [20] J.-H. Lee, “Analysis and Characterization of Fiber Nonlinearities with Deterministic and Stochastic Signal Sources,” 2000.
- [21] N. E. Hernández Romero, “Análisis de opciones tecnológicas de modulación y multiplexación en las redes ópticas de 100 Gbps y más,” Universidad Austral de Chile, 2015.
- [22] F. M. W. Ferro de Carvalho, “Optical Core Networks using OFDM Signal,” 2009.
- [23] M. C. España Boquera, *Comunicaciones Ópticas*. Madrid: Diaz de Santos, 2005.
- [24] D. Qian *et al.*, “1.05Pb/s Transmission with 109b/s/Hz Spectral Efficiency using Hybrid Single- and Few-Mode Cores,” in *Frontiers in Optics 2012/Laser Science XXVIII*, 2012, no. October 2012, p. FW6C.3.
- [25] E. Diaz Marín, “Diseño del despliegue de una red FTTH en una ciudad,” Universidad Politécnica de Madrid, 2017.
- [26] J. L. Altamirano Mejía, “Implementación óptica para mejorar el tráfico de red, entre los distritos de San Isidro y Miraflores,” Universidad Nacional Tecnológica de Lima Sur, 2017.
- [27] D. J. G. Holgado and J. M. F. Sánchez, *Diseño y simulación de sistemas OFDM / A ópticos para redes de nueva generación*. Cataluña: Centro Tecnológico de Telecomunicaciones de Cataluña, 2015.
- [28] M. Morant Pérez, “Arquitecturas y Nuevas Funcionalidades para Redes OFDM de

Acceso Óptico,” Universidad Politécnica de Valencia, 2011.

- [29] J. He, T. Li, X. Wen, R. Deng, M. Chen, and L. Chen, “Adaptive modulation and intra-symbol frequency-domain averaging scheme for multiband OFDM UWB over fiber system,” *Opt. Commun.*, vol. 358, pp. 45–53, 2016.
- [30] O. F. Corredor Camargo, L. F. Pedraza Martínez, and C. A. Hernández S., “OFDM: ‘Una breve perspectiva,’” *Visión Electrónica*, vol. 2, no. 2, pp. 86–97, 2008.
- [31] F. J. Valera Sanchez, “OFDMA y SC-FDMA en la Interfaz Radio de LTE,” Universidad de Sevilla. Escuela Técnica Superior de Ingeniería, 2012.
- [32] H. Bao and W. Shieh, “Transmission simulation of coherent optical OFDM signals in WDM systems,” *Opt. Express*, vol. 15, no. 8, p. 4410, 2007.
- [33] S. Behera, J. George, and G. Das, “Effect of Transmission Impairments in CO-OFDM Based Elastic Optical Network Design,” pp. 1–13, 2017.
- [34] O. González, S. Rodríguez, B. R. Mendoza, A. Ayala, and R. Pérez-Jiménez, “OFDM sobre canales ópticos no guiados en entornos con múltiples usuarios,” *URSI 2005, XX Simp. Nac. la Unión Científica Int. Radio*, p. 4, 2005.
- [35] R. Nieto F, “Sistemas de Transmisión por Fibra Óptica basados en Orthogonal Frequency-Division Multiplexing,” Universitat Politecnica de Catalunya, 2010.
- [36] E. Heras Miguel, “Fiber-based Orthogonal Frequency Division Multiplexing Transmission Systems,” Universitat Politecnica de Catalunya, 2010.
- [37] R. Bettancourt, H. Carrasco E., and R. Feick L., “Medición de ancho de banda de coherencia y dispersión temporal en la banda de 2.4 GHz en ambientes interiores.,” *Rev. Fac. Ing. Univ. Tarapacá*, vol. 13, no. 3, pp. 30–37, 2005.
- [38] T. S. Rappaport, *Wireless Communications: Principles and Practice*. 202AD.
- [39] G. Breed, “Bit Error Rate : Fundamental Concepts and Measurement Issues,” *High Freq. Electron.*, pp. 46–48, 2003.
- [40] L. Fresnel, “Understanding Error Vector Magnitude,” *Electronic Desing*, 2013. [Online]. Available: <http://www.electronicdesign.com/engineering-essentials/understanding-error-vector-magnitude>.
- [41] MathWorks, “Error Vector Magnitude (EVM),” *Documentation*, 2018. [Online]. Available: [https://la.mathworks.com/help/comm/ug/error-vector-magnitude-evm.html?searchHighlight=evm&s\\_tid=doc\\_srchtile](https://la.mathworks.com/help/comm/ug/error-vector-magnitude-evm.html?searchHighlight=evm&s_tid=doc_srchtile). [Accessed: 11-Jan-2017].
- [42] R. A. Shafik, M. S. Rahman, and A. H. M. R. Islam, “On the extended relationships among EVM, BER and SNR as performance metrics,” *Proc. 4th Int. Conf. Electr. Comput. Eng. ICECE 2006*, no. December, pp. 408–411, 2007.
- [43] S. O. Vásquez Sáschez, “Modelado y Simulación de Sistemas Ópticos Multiportadora para Incrementar la Eficiencia Espectral,” Universidad Nacional Autónoma de México, 2015.

- [44] J. García Zubía, I. Angulo Martínez, and J. M. Angulo Usategui, *Sistemas digitales y tecnología de computadores*. Thomson, 2007.
- [45] S. Haykin, *Sistemas de Comunicación*, Primera Ed. México, 2002.
- [46] J. Luque Rodríguez and S. Clavijo Suero, *Modulación de señales digitales*. Sevilla, 1995.
- [47] A. Ambardar, *Procesamiento de señales análogicas y digitales*, Segunda Ed. México, 1999.
- [48] MathWorks, "Documentation ifft." [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/fft.html?requestedDomain=www.mathworks.com>. [Accessed: 23-Jun-2017].
- [49] G. E. Campos Hernández and G. P. Sabogal Alfaro, "Software de simulación de diferentes tipos de modulación de señales de radiofrecuencia sobre fibra óptica," *Umbral Científico*, no. 9, pp. 76–84, 2006.
- [50] C. Mateo, N. Pérez, P. Garcia, P. L. Carro, J. De Mingo, and I. Salinas, "Linealización de un Enlace RoF mediante la Transformada Wavelet Estacionaria," *Jorn. Jóvenes Investig. del I3A*, vol. 3, no. 1, pp. 63–64, 2017.
- [51] J. J. Torres Granada, C. M. Serpa Imbett, G. M. Varón Durán, and N. Guerrero Gonzalez, "Hacia la próxima generación de sistemas de Radio sobre Fibra de banda ancha : retos tecnológicos en la banda de las ondas milimétricas Toward Next Generation Broadband Radio-over-Fiber Systems : Technological Challenges in the Millimeters-Wave Band," *Ing. y Desarro.*, vol. 29, pp. 242–265, 2011.
- [52] A. V. Oppenheim, A. S. Willsy, and S. H. Nawab, *Señales y Sistemas*, Segunda Ed. México: Prentice Hall, Inc., 1997.
- [53] J. Fujioka Rojas, *Una introducción a la ecuación no lineal de Schrödinger*. México: Universidad Nacional Autónoma de México, 2003.
- [54] B. El Hatifi El Hamdani, "Análisis Asintótico de fibras ópticas del índice gradual," Instituto Politécnico Nacional, 2003.
- [55] R. Ramaswami, K. N. Siravarajan, and G. H. Sasaki, *Optical Networks*. Burlington: Morgan Kaufmann & Elseiver Inc., 2010.
- [56] A. Marikani, *Engineering Physics*, 2 Edición. New Deli: PHI Learning Private Limited, 2013.
- [57] R. S. Quimby, *Photonics and Lasers: An Introduction*. 2006.
- [58] A. Leiva L., M. Tarifeño G., and R. Olivares V., "Efectos de la Dispersión por Modo de Polarización ( PMD ) en la propagación de pulsos a través de fibras ópticas," *Ingeniare. Rev. Chil. Ing.*, vol. 15, no. 3, pp. 336–343, 2007.
- [59] G. P. Agrawal, *Fiber-Optic communication systems*, Tercera Ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2002.

- [60] F. Moliner García, "Análisis del OSNR de configuraciones de enlaces de Fibra Óptica," Escuela Politécnica Superior, Universidad Autónoma de Madrid, 2009.
- [61] A. Vitoria Sánchez and P. Chamorro Posada, "Desarrollo de una herramienta de simulación de sistemas de comunicaciones ópticas."
- [62] B. Ortiz-Londono, D. Duque-Marin, and F. Amaya-Fernandez, "Numerical techniques for fiber optics propagation analysis," 2013, pp. 1–6.
- [63] J. G. Belmonte Beitia, "Ecuaciones de Schrödinger no lineales con no linealidad espacialmente inhomogénea," Ediciones de la Universidad de Castilla - La Mancha, Ciudad Real, 2008.

## ANEXO 1: MÉTODO DE *SPLIT STEP FOURIER* PARA LA SOLUCIÓN DE LA NLSE

Este anexo se presenta la secuencia que permite simular una fibra óptica teniendo en cuenta la atenuación y dispersión, a partir de la NLSE mediante el método SSF simétrico, en este método se divide la longitud de la fibra en un gran número de segmentos y se analiza la propagación de la señal a lo largo de la misma.

- A. Se definen los parámetros de la fibra óptica y se define la forma de la envolvente del campo eléctrico a la entrada de la fibra.
  - a. Se define la función de la señal de entrada a la fibra óptica, definiendo el periodo de muestreo.
  - b. Se definen las características de la ventana de tiempo.
    - i. La frecuencia de muestreo y el periodo de muestreo dependen de la máxima frecuencia de la señal que se puede representar.
  - c. Se definen parámetros del emisor de luz.
    - i. Longitud de onda.
    - ii. Potencia de la señal de entrada.
  - d. Se definen los parámetros de la fibra óptica.
    - i. El coeficiente no lineal.
    - ii. Índice de refracción.
    - iii. El coeficiente de dispersión.
    - iv. El coeficiente de atenuación
    - v. La longitud de la fibra óptica.
    - vi. Se define el tamaño del paso  $\Delta z = \phi_{max}/\gamma P(z = 0)$ , se asume  $\phi_{max} = 0.05$ .
- B. Se genera el operador lineal (ver Ec. 18).
- C. Se realiza un ciclo iterativo, en cada paso se evalúa el operador lineal y no lineal, lo que se repite para toda la longitud de la fibra óptica.



- a. Se aplica el método *Split-step Fourier* simétrico resolviendo primero la parte lineal en el dominio de la frecuencia y luego parte la no lineal también en el dominio de la frecuencia.
  - i. La señal de entrada se pasa al dominio de las frecuencias empleando la transformada directa de Fourier.
  - ii. Se aplica el operador lineal a la señal de entrada en el dominio de las frecuencias.
  - iii. Se transforma la señal del dominio de la frecuencia al dominio del tiempo, aplicando la transformada inversa de Fourier.
  - iv. Se calcula la intensidad de la señal, a través de su conjugada.
  - v. Se aplica a la señal el operador no lineal, a la señal en el tiempo.
  - vi. Se pasa la señal del dominio del tiempo a dominio en la frecuencia, aplicando transformada de Fourier.
  - vii. Se le aplica a la señal el operador lineal, a la señal en el tiempo.
  - viii. Se vuelve a pasar la señal del dominio de la frecuencia al dominio del tiempo, aplicando transformada inversa de Fourier.
  - ix. Se calcula la intensidad de la señal, a través de su conjugada.
  - x. Se aplica el operador no lineal con un delta espacial de valor de  $z+(h/2)$ .
  - xi. Se pasa la señal del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia, aplicando transformada de Fourier.
  - xii. Se le aplica a la señal el operador lineal.
  - xiii. Se vuelve a pasar la señal del dominio de la frecuencia al dominio del tiempo, aplicando transformada inversa de Fourier.
  - xiv. Se calcula la intensidad de la señal, a través de su conjugada.
  - xv. Se aplica operador no lineal con un delta espacial de valor de  $z+(h/2)$ .
  - xvi. Se pasa la señal del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia, aplicando transformada de Fourier.
  - xvii. Se le aplica a la señal el operador lineal.
  - xviii. Se vuelve a pasar la señal del dominio de la frecuencia al dominio del tiempo, aplicando transformada inversa de Fourier.

- xix. Se calcula la intensidad de la señal.
  - xx. Se hace un paso extra para poder calcular el error.
  - xxi. Se prueba si la solución está convergiendo por medio del cálculo del error, con el fin de seguir el ciclo iterativo.
- D. Se evalúa el criterio de convergencia (mediante una solución hacia adelante, para comparar con la actual).
- a. Se calcula el error haciendo iteraciones futuras y corrigiéndolas con las actuales.
  - b. Se compara con el número de pasos totales en el eje espacial.

## ANEXO 2: RESUMEN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN LA CAMPAÑA DE SIMULACIÓN

Este anexo se presenta un resumen de los resultados obtenidos en la campaña de simulación tanto para las variables originales del sistema como para la variación en algunos de los parámetros preestablecidos. Es así como los resultados presentados son: distancia máxima sin errores y número promedio de errores obtenidos en una transmisión de 1000 Km para un sistema que permite la transmisión una secuencia de datos utilizando OFDM óptico y radio sobre fibra.

Tabla 4: Distancia máxima sin errores y número promedio de errores en campaña de simulación

Variable del sistema cambiada	Aplicación de métodos de compensación de errores			Última distancia sin errores (Km)	Número promedio de errores
	<i>Back Propagation</i>	Prefijo Cíclico	Número portadoras: piloto		
Ninguna				0	96,613
Ninguna			X	1000	0
Ninguna		X		0	96,596
Ninguna		X	X	1000	0
Ninguna	X			1000	0
Ninguna	X		X	1000	0
Ninguna	X	X		1000	0
Ninguna	X	X	X	1000	0
Frecuencia: 5 GHz				0	96,177
Frecuencia: 5 GHz			X	560	2,955
Frecuencia: 5 GHz		X		0	96,21
Frecuencia: 5 GHz		X	X	577	2,935
Frecuencia: 5 GHz	X			1000	0
Frecuencia: 5 GHz	X		X	1000	0
Frecuencia: 5 GHz	X	X		1000	0
Frecuencia: 5 GHz	X	X	X	1000	0
Ancho de banda: 10MHz				2	96,613
Ancho de banda: 10MHz			X	1000	0
Ancho de banda: 10MHz		X		2	96,596
Ancho de banda: 10MHz		X	X	1000	0
Ancho de banda: 10MHz	X			1000	0
Ancho de banda: 10MHz	X		X	1000	0
Ancho de banda: 10MHz	X	X		1000	0
Ancho de banda: 10MHz	X	X	X	1000	0
Ancho de banda: 30MHz				2	96,613
Ancho de banda: 30MHz			X	1000	0
Ancho de banda: 30MHz		X		2	96,596
Ancho de banda: 30MHz		X	X	1000	96,596

Variable del sistema cambiada	Aplicación de métodos de compensación de errores			Última distancia sin errores (Km)	Número promedio de errores
	<i>Back Propagation</i>	Prefijo Cíclico	Número portadoras: piloto		
Ancho de banda: 30MHz	X			1000	0
Ancho de banda: 30MHz	X		X	1000	0
Ancho de banda: 30MHz	X	X		1000	0
Ancho de banda: 30MHz	X	X	X	1000	0
Dispersión: 2 ps/nm*Km				32	98,009
Dispersión: 2 ps/nm*Km			X	1000	0
Dispersión: 2 ps/nm*Km		X		32	98,009
Dispersión: 2 ps/nm*Km		X	X	1000	0
Dispersión: 2 ps/nm*Km	X			1000	0
Dispersión: 2 ps/nm*Km	X		X	1000	0
Dispersión: 2 ps/nm*Km	X	X		1000	0
Dispersión: 2 ps/nm*Km	X	X	X	1000	0
Dispersión: -2 ps/nm*Km				32	98,009
Dispersión: -2 ps/nm*Km			X	1000	0
Dispersión: -2 ps/nm*Km		X		32	98,009
Dispersión: -2 ps/nm*Km		X	X	1000	0
Dispersión: -2 ps/nm*Km	X			1000	0
Dispersión: -2 ps/nm*Km	X		X	1000	0
Dispersión: -2 ps/nm*Km	X	X		1000	0
Dispersión: -2 ps/nm*Km	X	X	X	1000	0
SNR: 10 dB				2	96,613
SNR: 10 dB			X	1000	0
SNR: 10 dB		X		2	96,596
SNR: 10 dB		X	X	1000	0
SNR: 10 dB	X			1000	0
SNR: 10 dB	X		X	1000	0
SNR: 10 dB	X	X		1000	0
SNR: 10 dB	X	X	X	1000	0
SNR: 5 dB				2	96,613
SNR: 5 dB			X	1000	0
SNR: 5 dB		X		2	96,596
SNR: 5 dB		X	X	1000	0
SNR: 5 dB	X			1000	0
SNR: 5 dB	X		X	1000	0
SNR: 5 dB	X	X		1000	0
SNR: 5 dB	X	X	X	1000	0
SNR: 0 dB				2	96,493
SNR: 0 dB			X	1000	0
SNR: 0 dB		X		2	96,469
SNR: 0 dB		X	X	1000	0
SNR: 0 dB	X			1000	0
SNR: 0 dB	X		X	1000	0
SNR: 0 dB	X	X		1000	0
SNR: 0 dB	X	X	X	1000	0
Número portadoras: 256				2	193,285
Número portadoras: 256			X	1000	0

Variable del sistema cambiada	Aplicación de métodos de compensación de errores			Última distancia sin errores (Km)	Número promedio de errores
	<i>Back Propagation</i>	Prefijo Cíclico	Número portadoras: piloto		
Número portadoras: 256		X		2	193,194
Número portadoras: 256		X	X	1000	0
Número portadoras: 256	X			1000	0
Número portadoras: 256	X		X	1000	0
Número portadoras: 256	X	X		1000	0
Número portadoras: 256	X	X	X	1000	0
Número portadoras: 512				2	386,529
Número portadoras: 512			X	1000	0
Número portadoras: 512		X		2	386,503
Número portadoras: 512		X	X	1000	0
Número portadoras: 512	X			1000	0
Número portadoras: 512	X		X	1000	0
Número portadoras: 512	X	X		1000	0
Número portadoras: 512	X	X	X	1000	0
Gamma: 4/1000				3	96,456
Gamma: 4/1000			X	1000	0
Gamma: 4/1000		X		3	96,46
Gamma: 4/1000		X	X	1000	0
Gamma: 4/1000	X			1000	0
Gamma: 4/1000	X		X	1000	0
Gamma: 4/1000	X	X		1000	0
Gamma: 4/1000	X	X	X	1000	0
Gamma: 1/1000				0	96,775
Gamma: 1/1000			X	1000	0
Gamma: 1/1000		X		0	96,746
Gamma: 1/1000		X	X	1000	0
Gamma: 1/1000	X			1000	0
Gamma: 1/1000	X		X	1000	0
Gamma: 1/1000	X	X		1000	0
Gamma: 1/1000	X	X	X	1000	0
Símbolos modulación PSK: 8				0	112,357
Símbolos modulación PSK: 8			X	787	0,489
Símbolos modulación PSK: 8		X		0	112,326
Símbolos modulación PSK: 8		X	X	742	0,54
Símbolos modulación PSK: 8	X			1000	0
Símbolos modulación PSK: 8	X		X	1000	0
Símbolos modulación PSK: 8	X	X		1000	0
Símbolos modulación PSK: 8	X	X	X	1000	0
Símbolos modulación PSK: 16				0	120,344
Símbolos modulación PSK: 16			X	646	2,019
Símbolos modulación PSK: 16		X		0	120,361
Símbolos modulación PSK: 16		X	X	621	1,961
Símbolos modulación PSK: 16	X			1000	0
Símbolos modulación PSK: 16	X		X	1000	0
Símbolos modulación PSK: 16	X	X		1000	0
Símbolos modulación PSK: 16	X	X	X	1000	0

Variable del sistema cambiada	Aplicación de métodos de compensación de errores			Última distancia sin errores (Km)	Número promedio de errores
	<i>Back Propagation</i>	Prefijo Cíclico	Número portadoras: piloto		
Símbolos modulación PSK: 32				0	124,305
Símbolos modulación PSK: 32			X	610	2,7
Símbolos modulación PSK: 32		X		0	124,288
Símbolos modulación PSK: 32		X	X	557	2,786
Símbolos modulación PSK: 32	X			1000	0
Símbolos modulación PSK: 32	X		X	1000	0
Símbolos modulación PSK: 32	X	X		1000	0
Símbolos modulación PSK: 32	X	X	X	1000	0
Símbolos modulación PSK: 64				0	126
Símbolos modulación PSK: 64			X	484	2,988
Símbolos modulación PSK: 64		X		0	126,276
Símbolos modulación PSK: 64		X	X	489	3,152
Símbolos modulación PSK: 64	X			1000	0
Símbolos modulación PSK: 64	X		X	1000	0
Símbolos modulación PSK: 64	X	X		1000	0
Símbolos modulación PSK: 64	X	X	X	1000	0