



REPÚBLICA DEL ECUADOR

Escuela Politécnica Nacional

"SCIENTIA HOMINIS SALUS"

La versión digital de esta tesis está protegida por la Ley de Derechos de Autor del Ecuador.

Los derechos de autor han sido entregados a la "ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL" bajo el libre consentimiento del (los) autor(es).

Al consultar esta tesis deberá acatar con las disposiciones de la Ley y las siguientes condiciones de uso:

- Cualquier uso que haga de estos documentos o imágenes deben ser sólo para efectos de investigación o estudio académico, y usted no puede ponerlos a disposición de otra persona.
- Usted deberá reconocer el derecho del autor a ser identificado y citado como el autor de esta tesis.
- No se podrá obtener ningún beneficio comercial y las obras derivadas tienen que estar bajo los mismos términos de licencia que el trabajo original.

El Libre Acceso a la información, promueve el reconocimiento de la originalidad de las ideas de los demás, respetando las normas de presentación y de citación de autores con el fin de no incurrir en actos ilegítimos de copiar y hacer pasar como propias las creaciones de terceras personas.

Respeto hacia sí mismo y hacia los demás.

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

ESTUDIO COMPARATIVO DEL DESEMPEÑO DE OFDM- MIMO Y FOFDM-MIMO EN FIBRA ÓPTICA DE POCOS MODOS CON BAJO DMGD

TESIS PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL GRADO DE MAGÍSTER EN
CONECTIVIDAD Y REDES DE TELECOMUNICACIONES

MILTON NAPOLEÓN TIPÁN SIMBAÑA

miltontipan@gmail.com

Director: Ing. Xavier Calderón. M.Sc.

xavier.calderon@epn.edu.ec

Co-Director: Ing. Germán Arévalo. M.Sc.

grevalo@ups.edu.ec

Quito, diciembre 2016

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

ESTUDIO COMPARATIVO DEL DESEMPEÑO DE OFDM-MIMO Y FOFDM-MIMO EN FIBRA ÓPTICA DE POCOS MODOS CON BAJO DMGD

**TESIS PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL GRADO DE MAGÍSTER EN
CONECTIVIDAD Y REDES DE TELECOMUNICACIONES**

MILTON NAPOLEÓN TIPÁN SIMBAÑA

miltontipan@gmail.com

Director: Ing. Xavier Calderón. M.Sc.

Xavier.calderon@epn.edu.ec

Co-Director: Ing. Germán Arévalo. M.Sc.

garevalo@ups.edu.ec

Quito, diciembre 2016

DECLARACIÓN

Yo, Milton Napoleón Tipán Simbaña, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

Milton Napoleón Tipán Simbaña

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo fue desarrollado por Milton Napoleón Tipán Simbaña, bajo nuestra supervisión.

Ing. Xavier Calderón. M.Sc.
DIRECTOR

Ing. German Arévalo. M.Sc.
CO-DIRECTOR

AGRADECIMIENTO

Primero agradezco a **Dios, la Virgen María y a mi madre** quienes desde el cielo me han protegido y guiado en este largo pero fascinante caminar hacia la consecución de esta nueva meta académica.

A mi padre quien con sus consejos ha guiado mi vida siempre por el camino de la excelencia, a mi familia quienes han sabido apoyarme y ayudarme con sus palabras siempre de cariño y aliento.

A mi amada esposa Alexandra por su comprensión, cariño y amor, pese a todos los problemas y malas noches fruto de este esfuerzo conjunto.

A Xavier, mi director de tesis, por la dedicación y excelente trabajo en la consecución de este escrito, así también a Germán por su guía académica y sus palabras siempre de apoyo.

A la Escuela Politécnica Nacional y todo su cuerpo docente, por los conocimientos y tiempo brindado en formarme.

Milton.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a todas las personas que con esfuerzo, sacrificio, tiempo y amor han coadyuvado a la culminación de este trabajo, en especial a mis hermanas, sobrinos y sobrinas para que sepan que siempre son parte de mi vida y que las metas que una se ponga siempre con esfuerzo y constancia se consiguen.

Milton

CONTENIDO

DECLARACIÓN	i
CERTIFICACIÓN	ii
AGRADECIMIENTO.....	iii
DEDICATORIA.....	iv
CONTENIDO.....	v
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
ÍNDICE DE TABLAS	x
RESUMEN	xi
PRESENTACIÓN	xii
CAPÍTULO 1	1
MODULACIONES MULTIPORTADORA EN SISTEMAS ÓPTICOS.....	1
1.1 Sistemas multiportadora	1
1.1.1 OFDM.....	2
1.1.2 FOFDM	5
1.2 Sistemas de fibra óptica.....	7
1.2.1 Fibra óptica monomodo.....	7
1.2.2 Fibra óptica multimodo	9
1.2.3 Fibra óptica de pocos modos	11
1.3 Sistemas de múltiples antenas	15
1.3.1 Sistema MIMO	15
1.3.2 Código espacio temporal de Alamouti	16
CAPÍTULO 2	19
ARQUITECTURA Y MODELO DE SIMULACIÓN	19
2.1 Estado del arte de sistemas multiportadora ofdm y fofdm en fibra óptica de pocos modos	19

2.2	Arquitectura del sistema	22
2.3	Canal óptico de pocos modos	23
2.3.1	Modelo numérico de propagación no lineal de fibra óptica bimodal	24
2.3.2	Validación del modelo numérico.....	25
CAPÍTULO 3		32
SIMULACIÓN DE LOS MODELOS DE TRANSMISIÓN		32
3.1	Descripción del software de co-simulación implementado.....	33
3.2	Descripción del sistema de simulación implementado.....	41
3.3	Simulaciones comparativas de OFDM-MIMO y FOFDM-MIMO.....	46
CAPÍTULO 4		52
ANÁLISIS DE RESULTADOS		52
4.1	Comparación de la potencia de entrada.....	52
4.2	Comparación de la variación del DMGD.....	56
CAPÍTULO 5		59
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		59
5.1	Conclusiones.....	59
5.2	Recomendaciones	61
BIBLIOGRAFÍA		62
7. ANEXOS.....		69
7.1	Anexo 1: Pantallas de co-simulación.....	69
7.2	Anexo 2: Algoritmos de co-simulación.....	75
7.3	Anexo 3: Código de co-simulación	82

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Señales monoportadora y multiportadora [3]	2
Figura 1.2 Esquema básico del transmisor OFDM [4]	2
Figura 1. 3 Esquema básico del receptor OFDM [5]	3
Figura 1. 4 Interferencia de símbolos OFDM [4].....	3
Figura 1. 5 Prefijo cíclico en OFDM [4].....	4
Figura 1. 6 Implementación de OFDM [4]	4
Figura 1. 7 Espectros de señales multiportadoras OFDM y FOFDM [6]	5
Figura 1. 8 Implementación de FOFDM [8]	6
Figura 1. 9 Fibra óptica monomodo [21].....	8
Figura 1. 10 Propagación en la fibra óptica [22].....	9
Figura 1. 11 Perfiles de propagación en la fibra óptica multimodo. (a) Paso. (b) Gradual. [21].....	10
Figura 1. 12 Relación entre los modos de propagación [22]	13
Figura 1. 13 Propagación de dos modos. (a) LP01. (b) LP11. [24]	14
Figura 1. 14 Sistema MIMO [34].....	15
Figura 1. 15 Sistema STC [34]	17
Figura 1. 16 Sistema STBC [37].....	18
Figura 2. 1 Esquema de transmisión propuesto	22
Figura 2. 2 Atenuación del modelo numérico a 3 dB/Km en 1Km. (a) Modo1. (b) Modo 2.	26
Figura 2. 3 DMGD del modelo numérico para 2.1 ps/km en 100 Km. (a) Modo1. (b) Modo 2	27
Figura 2.4 Dispersión del modelo numérico para 17 ps/nmKm . (a) Modo 1. (b) Modo 2	27
Figura 2. 5 Validación de parte lineal del modelo numérico para FMF. (a) Modo 1. (b) Modo 2	28
Figura 2. 6 Efecto del acoplamiento intramodal con $\gamma_{11} = \gamma_{22} = 0.4$. (a) Modo 1. (b) Modo 2	29
Figura 2. 7 Acoplamiento intramodal con $\gamma_{12} = 0.4\gamma_{21} = 2$. (a) Modo 1. (b) Modo 2	29
Figura 2. 8 Acoplamiento intramodal con $\gamma_{21} = 2\gamma_{11} = 0.4$. (a) Modo 1. (b) Modo 2	30

Figura 2. 9 Validación de la parte no lineal para XG-PON. (a) Modo1. (b) Modo 2	31
Figura 3. 1 Esquema implementado en co-simulación.....	32
Figura 3. 2 Diagrama de flujo del modulador digital. (a) Modulador. (b) Función .	33
Figura 3. 3 Diagrama de flujo de codificador Alamouti. (a) Codificador. (b) Función	34
Figura 3. 4 Diagrama de flujo del modulador multiportadora. (a) Modulador. (b) Función.	35
Figura 3. 5 Diagrama de flujo del modulador en cuadratura. (a) Modulador. (b) Función	35
Figura 3. 6 Diagrama de flujo para FMF. (a) Canal . (b) Generación de pulsos gaussianos.	36
Figura 3. 7 Diagrama de flujo para la solución de la CNLSE de la fibra óptica de pocos modos.....	37
Figura 3. 8 Diagrama de flujo del demodulador en cuadratura. (a) demodulador. (b) Función	38
Figura 3. 9 Diagrama de flujo de demodulador multiportadora. (a) Demodulador. (b) Función	39
Figura 3. 10 Diagrama de flujo del decodificador STBC.....	40
Figura 3. 11 Diagrama de flujo del demodulador digital. (a) Demodulador. (b) Función	40
Figura 3. 12 Diagrama de flujo del contador de errores BER, EVM y Q^2	41
Figura 3. 13 Señal OFDM con secuencias de entrenamiento para sincronización y ecualización. (a) Para el modo 1. (b) Para el modo2.	42
Figura 3- 14 Espectro de la señal FOFDM. (a) Banda base. (b) Banda pasante .	43
Figura 3. 15 Campo modal y espectro óptico para sistema multiportadora FOFDM	44
Figura 3. 16 Espectros para modulación BPSK. (a) OFDM. (b) DSB-FOFDM.	47
Figura 3. 17 Desempeño del sistema óptico con fibra óptica de pocos modos para sistemas multiportadora con modulación BPSK. (a) OFDM. (b). DSB-FOFDM ...	48
Figura 3. 18 Espectros para modulación QPSK. (a) OFDM. (b) DSB-FOFDM.....	49
Figura 3. 19 Desempeño del sistema óptico con fibra óptica de pocos modos para sistemas multiportadora con modulación QPSK. (a) OFDM. (b). DSB-FOFDM...	49

Figura 3. 20 Espectros para modulación 16QAM. (a) OFDM. (b) DSB-FOFDM. .	50
Figura 3- 21 Desempeño del sistema óptico con fibra óptica de pocos modos para sistemas multiportadora con modulación 16QAM. (a) OFDM. (b). DSB-FOFDM.	51
Figura 4. 1 Comparación de la potencia de entrada de los sistemas OFDM y DSB-FOFDM con modulación BPSK para 20 km de fibra óptica de pocos modos	53
Figura 4. 2 Comparación de la potencia de entrada de los sistemas OFDM y DSB-FOFDM con modulación QPSK para 20 km de fibra óptica de pocos modos	54
Figura 4. 3 Comparación de la potencia de entrada de los sistemas OFDM y DSB-FOFDM con modulación 16QAM para 20 km de fibra óptica de pocos modos	55
Figura 4. 4 Comparación del desempeño del sistema óptico al variar el DMGD de la fibra óptica de pocos modos para los sistemas multiportadora OFDM y FOFDM a $BER=1 \cdot 10^{-3}$	56
Figura 4. 5 Comparación del desempeño del sistema óptico al variar el DMGD de la fibra óptica de pocos modos para los sistemas multiportadora OFDM y FOFDM a $BER=1 \cdot 10^{-3}$	57
Figura 4. 6 Comparación del desempeño del sistema óptico al variar el DMGD de la fibra óptica de pocos modos para los sistemas multiportadora OFDM y FOFDM a $BER=1 \cdot 10^{-3}$	58

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Codificación espacio temporal Alamouti.....	17
Tabla 2.1 Comparación de modelos de simulación para FMF	23
Tabla 3.1 Parámetros de simulación para FMF.....	44

RESUMEN

Esta tesis de maestría tiene como propósito, el estudio comparativo de las señales multiportadora Fast-Orthogonal Frequency Division Multiplexing (*FOFDM*) y Orthogonal Frequency Division Multiplexing (*OFDM*) en sistemas de fibra óptica multimodo focalizada en la fibra de pocos modos en su versión de dos modos.

Este sistema se implementa mediante la co-simulación del software de modelamiento numérico Matlab y el software de simulación de sistemas ópticos Optsim usando su herramienta ModeSYS, la cual permite simular sistemas de fibra multimodo.

Se implementan dos sistemas de transmisión de radio sobre fibra óptica, uno para OFDM y otro para FOFDM, los cuales se basan en las transformadas discretas de Fourier y de Coseno respectivamente. Estas modulaciones multiportadoras contienen subportadoras que provienen de modulaciones digitales BPSK, QPSK y 16QAM, las cuales se alimentan mediante datos a 40 Gb/s; estas subportadoras son codificadas mediante el codificador espacio temporal (*STBC, Space Time Bloque Code*) de Alamouti, con lo que se consiguen dos flujos de datos los cuales son modulados en OFDM o FOFDM.

Estos flujos modulados en banda base son subidos a pasa banda a 60 GHz emulando un sistema de radio sobre fibra óptica directo a la antena; moduladores en intensidad acoplados a láseres de cavidad externa (*ECL, External Cavity Laser*) son usados para transmitir la señal eléctrica en la fibra óptica de pocos, la cual es implementada mediante la ecuación no lineal de Schrödinger acoplada, para los modos LP01 y LP11, esta fibra óptica se simula con bajo retardo de grupo modal diferencial y una longitud de 20 km para simular un red de acceso; dos fotodetectores PIN son usados para detectar la señal óptica y convertirla a señales eléctricas, estas señales multiportadoras entonces son bajadas a banda base y los símbolos son recuperados después de los demoduladores OFDM y FOFDM.

Finalmente, los símbolos recuperados son decodificados mediante un decodificador STBC que implementa el algoritmo de zero forcing, entonces, son ecualizados y enviados al demodulador digital para proceder a evaluar el sistema mediante los parámetros de desempeño EVM (*Error Vector Magnitude*) y Q^2 .

PRESENTACIÓN

En este trabajo, se presenta el estudio comparativo de Fast-OFDM y OFDM en sistemas ópticos que utilizan fibras ópticas de pocos modos, en particular fibra óptica de dos modos (*Two Mode Fiber, TMF*). Este documento se encuentra organizado de la siguiente manera:

En el capítulo 1 se abordan los principios generales de las modulaciones multiportadora, se enfatiza en las modulaciones OFDM y FOFDM revisando sus ventajas y desventajas. Además, se revisan los tipos de fibra óptica y sus características, resaltando las fibras ópticas de pocos modos (*FMF*). Se abordan también las técnicas de multiplexación y las técnicas de múltiples entradas y múltiples salidas (*MIMO, Multiple Input Multiple Output*) para redes ópticas, centradas en el código espacio temporal de Alamouti.

El capítulo 2 se enfoca en el análisis de la arquitectura del sistema de transmisiones OFDM-MIMO y FOFDM-MIMO, el modelo de simulación de la fibra óptica de pocos modos con bajo retardo de grupo modal diferencial (*DMGD, Differential Mode Group Delay*) y las modulaciones multiportadora OFDM-MIMO y FOFDM-MIMO.

El capítulo 4 contiene las configuraciones de los sistemas de transmisión OFDM-MIMO y FOFDM-MIMO, así como los resultados obtenidos de las simulaciones realizadas en estos sistemas para su comparación.

En el capítulo 4 se discuten los resultados obtenidos de la comparación del factor de calidad Q^2 y la potencia de entrada respecto al desempeño de las dos técnicas de modulación multiportadora.

Finalmente, en el capítulo 5 se exponen las principales conclusiones derivadas del trabajo, así como las recomendaciones para trabajos futuros.

CAPÍTULO 1

MODULACIONES MULTIPORTADORA EN SISTEMAS ÓPTICOS

El aumento de aplicaciones de voz, datos y video han obligado a incrementar la capacidad de las redes inalámbricas mediante el uso de múltiples antenas o señales multiportadoras. Los proveedores de servicios de telecomunicaciones con el fin de solventar esta necesidad y de diversificar los servicios que presta han optado por proveer estos diferentes servicios mediante el uso de fibra óptica. Lo anterior, ha llevado a la creación de redes de radio sobre fibra óptica (Radio Over Fiber, RoF), en la cual convergen las bondades de una gran capacidad dada por la fibra óptica y la movilidad de las redes inalámbricas; pero, también se incluyen las desventajas de cada uno de estas redes como las no linealidades en la fibra óptica y las altas atenuaciones en altas frecuencias en los canales inalámbricos [1], [2].

1.1 SISTEMAS MULTIPORTADORA

El incremento del número de usuarios y las aplicaciones en tiempo real obligan a aumentar la capacidad y la velocidad de transmisión de los sistemas inalámbricos, una manera de incrementar la capacidad es transmitir una señal con gran ancho de banda; sin embargo, se necesita una relación señal a ruido alta debido al desvanecimiento ocasionado por el canal de transmisión. Para mitigar este problema se envían varias señales (subportadoras) en paralelo multiplexadas en frecuencia a velocidades de transmisión más bajas, lo que implica que, el desvanecimiento del canal les afecta menos, ya que el ancho de banda total se divide para el número de sub portadoras, haciendo que para la mayoría de subportadoras el canal inalámbrico con desvanecimiento se vea como uno sin desvanecimiento, y por lo tanto, se puede tener una relación señal a ruido menor como se ilustra en la Figura 1.1, a este tipo de modulación se la conoce como multiportadora [3]; en ella se aprecia como la portadora de banda ancha es afectada en varios puntos por el canal con desvanecimiento en frecuencia degradando el sistema de comunicación, al contrario en el sistema con varias subportadora pocas son degradadas por los desvanecimientos del canal mejorando el sistema de comunicación.

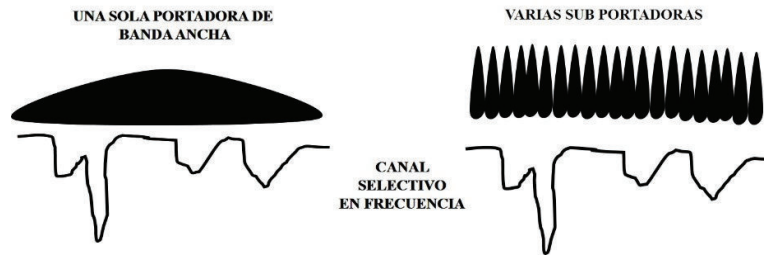


Figura 1.1 Señales monoportadora y multiportadora [3]

1.1.1 OFDM

La multiplexación por división de frecuencia ortogonal (OFDM) es un tipo de sistema de transmisión multiportadora, cuya característica principal radica en la ortogonalidad que tienen las subportadoras entre sí. La Figura 1.2, muestra el esquema básico de una modulación OFDM.

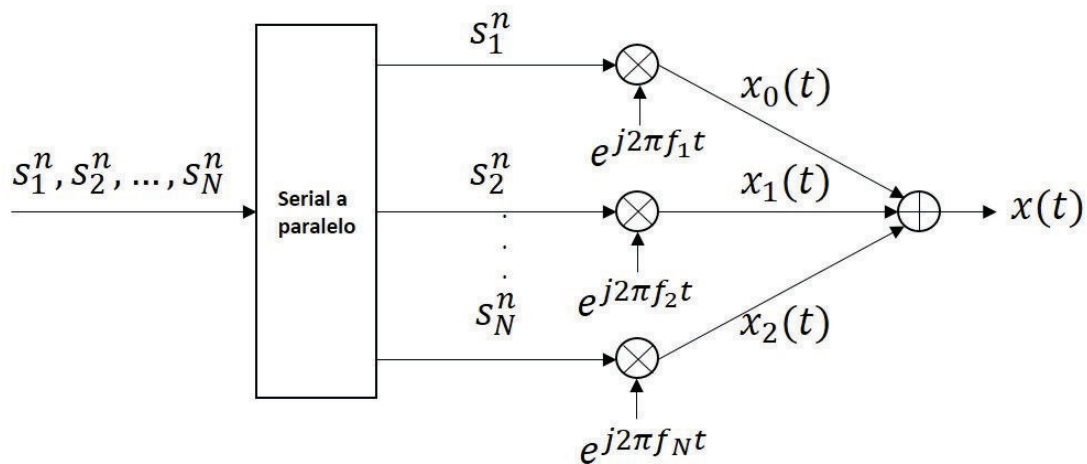


Figura 1.2 Esquema básico del transmisor OFDM [4]

Este esquema, consiste de un conjunto de N símbolos S , los cuales son convertidos de serial a paralelo, los mismos que entran en un banco de N moduladores complejos, donde cada modulador corresponde a una sub portadora OFDM, para finalmente, ser sumados y formar un símbolo OFDM n – ésimo $x(t)$.

Al demodulador OFDM llega la señal $y(t)$, la misma que pasa por banco de correladores, uno para cada sub portadora, obteniéndose los símbolos \widehat{S}_N^n estimados que se transmitieron, como se indica en la Figura 1.3. Tomado en

consideración la ortogonalidad de las sub portadoras para un caso ideal, en donde no existe interferencia entre dos sub portadoras contiguas después de la demodulación, lo que permite que, los sus espectros pueden solaparse reduciendo así, el ancho de banda de la señal OFDM [4].

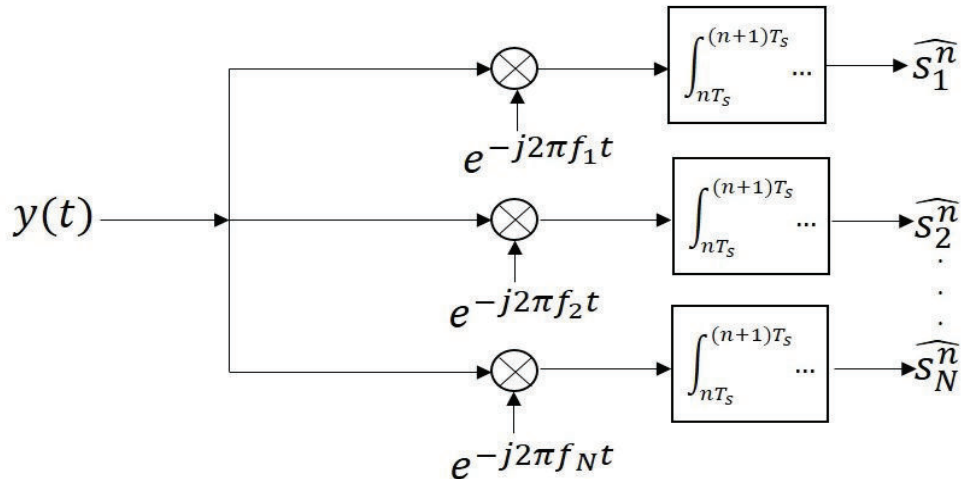


Figura 1. 3 Esquema básico del receptor OFDM [5]

Sin embargo, no es posible tener una canal de transmisión ideal, en consecuencia, se pierde esta ortogonalidad en especial en canales dispersivos en tiempo, donde el intervalo de correlación del demodulador T_s en un camino, podría sobre montarse con un símbolo contiguo de otro camino m – éximo, como indica la Figura 1.4.

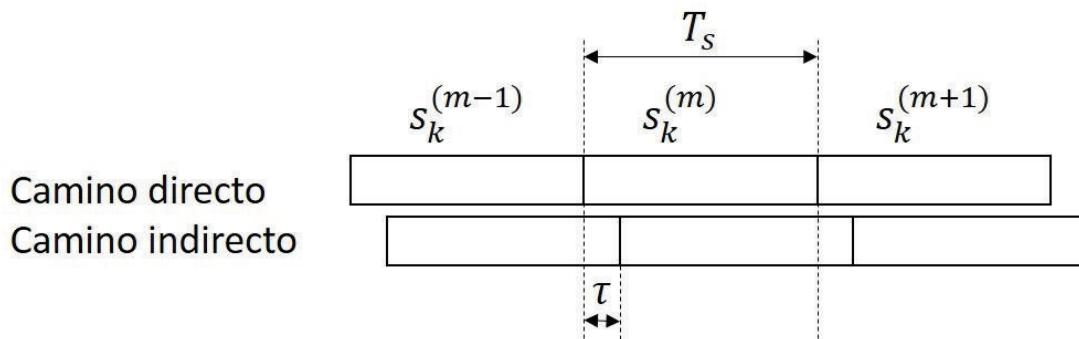


Figura 1. 4 Interferencia de símbolos OFDM [4]

Para evitar esta interferencia se usa un prefijo cíclico, el cual consiste en colocar la parte final de la señal de un símbolo OFDM al inicio del mismo, la longitud de la señal copiada depende del tiempo de coherencia del canal de transmisión, de manera que el retardo de tiempo τ sea menor que el tiempo de coherencia del canal τ_c , esto se muestra en la Figura 1.5.

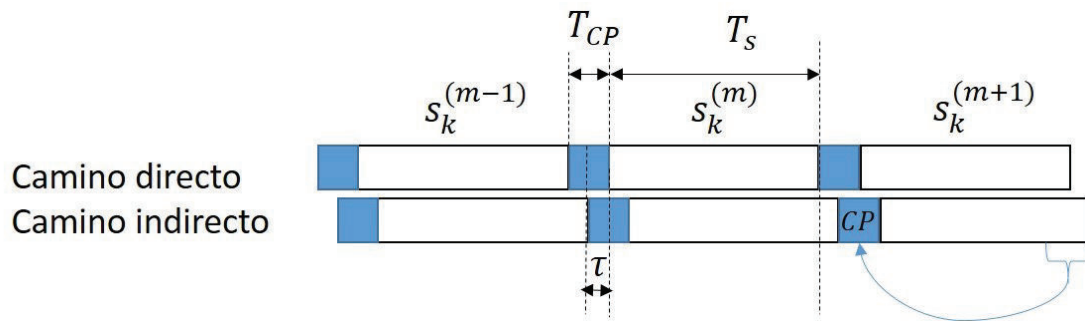


Figura 1. 5 Prefijo cíclico en OFDM [4]

Entonces, el periodo del símbolo OFDM es:

$$T = T_{CP} + T_S \quad (1.1)$$

Donde T es el tiempo de duración del símbolo OFDM, T_{CP} es el tiempo de duración del prefijo cíclico y T_S es el tiempo de duración de las subportadoras. OFDM es implementado en la práctica mediante la Transformada Inversa de Fourier (IFFT) para el transmisor y la Transformada Directa de Fourier (FFT) para el receptor, la Figura 1.6 indica el esquema de un sistema OFDM en banda base.

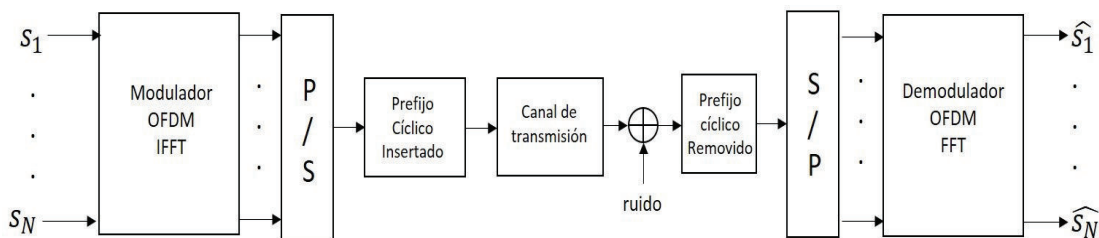


Figura 1. 6 Implementación de OFDM [4]

Entonces, la señal OFDM puede ser representada como [5]:

$$x(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \sum_{k=1}^N s_{k,n} g_k(t - nT) \quad (1.2)$$

$$g_k = \prod(t) \exp(j2\pi f_k t) \quad (1.3)$$

$$\prod(t) = \begin{cases} 1, & (0 < t \leq T) \\ 0, & (t \leq 0, t > T) \end{cases} \quad (1.4)$$

Donde $s_{k,n}$ es el símbolo complejo n –ésimo de la subportadora k –ésima, g_k es la forma de onda de la subportadora k –ésima, N es el número de subportadoras, f_k es la frecuencia de las subportadoras y T es el periodo del símbolo. Uno de los principales problemas de OFDM es el uso del prefijo cíclico para mantener la ortogonalidad entre sus subportadoras y esto reduce su eficiencia espectral.

1.1.2 FOFDM

La multiplexación por división de frecuencia ortogonal rápida (FOFDM), es un tipo de modulación multiportadora que hace más eficiente el uso del espectro, ya que, reduce a la mitad la separación entre portadoras, si se las compara con OFDM como se muestra en la Figura 1.7 [6].

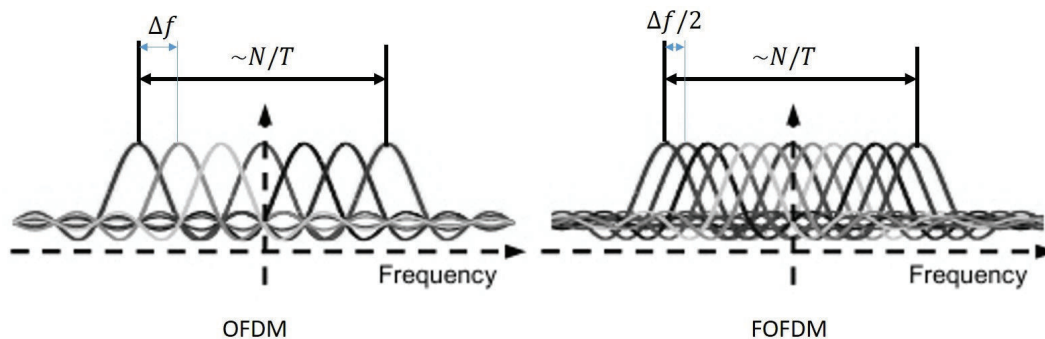


Figura 1.7 Espectros de señales multiportadoras OFDM y FOFDM [6]

El ancho de banda de una señal OFDM puede ser aproximado por [5]: $BW_{OFDM} \approx \frac{N_{sc}+1}{N_{sc}} \cdot \frac{R}{\log_2 M}$ donde, N_{sc} es el número de subportadoras, R es la velocidad de transmisión y M los niveles de la modulación digital. Por lo tanto, se puede aproximar el ancho de banda de la señal FOFDM como: $BW_{FOFDM} \approx \frac{BW_{OFDM}}{2}$

FOFDM emplea funciones ortogonales $\cos(2\pi kt/T)$ para reducir el espacio entre subportadoras a $1/2T$, entonces la señal FOFDM puede ser escrita matemáticamente como [7]:

$$x(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \sum_{k=1}^N s_{k,n} g_k(t - nT) \quad (1.5)$$

$$g_k = \prod(t) \operatorname{Re}\{\exp(j\pi f_k t)\} \quad (1.6)$$

$$\prod(t) = \begin{cases} 1, & (0 < t \leq T) \\ 0, & (t \leq 0, t > T) \end{cases} \quad (1.7)$$

Esta señal multiportadora puede ser implementada de similar manera que OFDM salvo que es necesario el uso de la transformada discreta inversa del coseno (IDTC) en el transmisor y la transformada discreta directa del coseno (DCT) en el receptor, el diagrama de bloques de un sistema básico FOFDM se presenta en la Figura 1.8 [8].

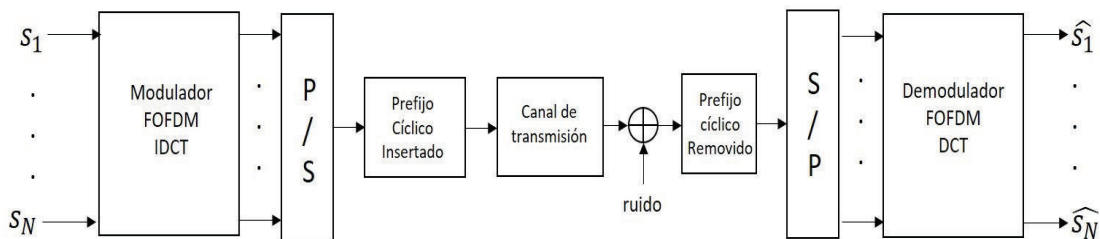


Figura 1.8 Implementación de FOFDM [8]

La principal desventaja de FOFDM es el uso de símbolos producto de modulaciones reales tales como BPSK (*Binary Phase Shift Keying*) o ASK (*Amplitude Shift Keying*) para ser usados con la DCT. Sin embargo, varios esfuerzos se han realizado para poder usar modulaciones de tipo compleja como QPSK (*Quadrature Phase Shift Keying*) o QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*), como el uso de moduladores ópticos en cuadratura, subir en frecuencia la parte real y parte imaginaria de los símbolos complejos y unir sus espectros desfasados [9]–[11].

1.2 SISTEMAS DE FIBRA ÓPTICA

Los usuarios tienen cada vez más acceso a redes de banda ancha ya sean estas cableadas o inalámbricas por medio de sus computadoras personales o celulares inteligentes. Esto ha llevado a un incremento en el tráfico que estas redes soportan, así, se prevé que las redes de Ethernet que actualmente soportan velocidades de 10 y 100 Gb/s pasen a 400 y 1000 Gb/s en el 2020, que las redes de acceso pasen de 1 Gb/s a 100 Gb/s y en las redes de transporte vayan de 1 Tb/s a 100 Tb/s en el 2025 [12].

Por lo anterior, el uso de fibra óptica se hace necesario para cubrir estas altas demandas de tráfico, pero existe una brecha entre la capacidad que las actuales redes de fibra óptica pueden soportar y las que se necesitan a futuro, en especial las redes que usan fibra óptica monomodo. Lo anterior, ha llevado a usar el término denominado "Capacity Crunch" [13], el cual se da cuando la demanda del ancho de banda de las comunicaciones exceden la capacidad de un sistema de fibra óptica individual, ante ello se hace necesario el uso de nuevas técnicas y la generación de nuevas fibras que permitan soportar e incrementar la capacidad de los sistemas actuales.

Así, la generación de nuevas fibras ópticas como fibras de múltiples núcleos (*MCF*, *Multi Core Fiber*) y fibras de pocos modos (*FMF*, *Few Mode Fiber*) se proyectan como las principales alternativas [14]. Además, necesitan ser soportadas por técnicas de múltiples entradas y múltiples salidas (*MIMO*, *Multiple Input Multiple Output*) [15], técnicas de multiplexación/demultiplexación espacial (*SDM*, *Space Division Multiplexing*) [16][17] y multiplexación/demultiplexación por división de modo (*MDM*, *Mode Division Multiplexing*) [18][19][20].

1.2.1 FIBRA ÓPTICA MONOMODO

El desarrollo de la telefonía en los años 20 llevo al diseño de sistemas de comunicaciones, los cuales usaban como medio de transmisión cable coaxial en 1940 y sistemas de microondas en 1948. Un parámetro usado para medir la capacidad de tales sistemas era el producto de la velocidad de transmisión y la distancia de repetición, para 1970 se disponían de sistemas que tenían un valor aproximado de 100 (Mb/s)-Km, esto gracias al uso de la luz como portadora, la cual estaba confinada en una guía de vidrio, la misma que podía transportar la luz tal

como los alambres guían a los electrones. Esta estructura se muestra en la Figura 1.9, la cual, contiene un núcleo y un revestimiento con índice de refracción n_1 y n_2 respectivamente, con $n_2 < n_1$, lo que permite una refracción total del haz de luz y solo poca de ella se escapa en forma de radiación entre el núcleo y el revestimiento [21].

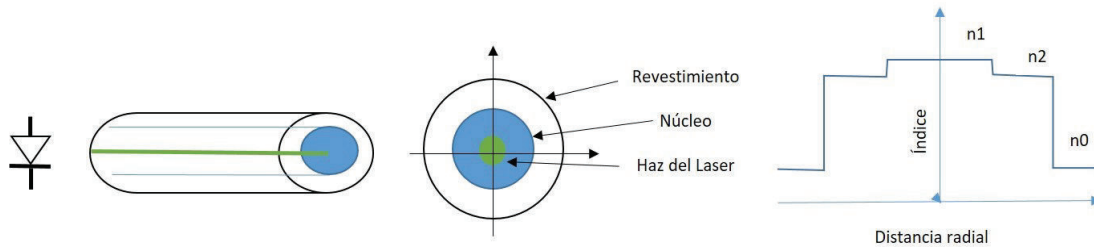


Figura 1. 9 Fibra óptica monomodo [21]

La invención del láser en 1960 y la reducción del tamaño del núcleo de la fibra óptica en su construcción, permitieron que la luz viaje por un sólo camino o modo a través de la fibra óptica (*SMF, Single Mode Fiber*), lo que redujo el ensanchamiento del pulso óptico (dispersión) y permitió incrementar la velocidad de transmisión.

Para que sea posible la transmisión en la fibra óptica, el haz de luz debe ser proyectado en un determinado ángulo de incidencia θ_i dentro del cono de aceptación, éste se refracta en un ángulo θ_r al ingresar al núcleo de fibra óptica para luego ser reflejado en el interior del núcleo. Si el ángulo de incidencia está en el límite del cono de aceptación θ_a , se forma el ángulo crítico ϕ_c , que es el límite para la propagación al interior del núcleo; un valor menor a este provocará que la luz no se refleje sino se refracte entre el núcleo y el revestimiento y se propague entre ellos hasta desvanecerse, este fenómeno se ilustra en la Figura 1.10 [22].

Este fenómeno es descrito por la bien conocida ley de Snell así [21]:

$$n_0 \sin \theta_i = n_1 \sin \theta_r \quad (1.8)$$

Donde θ_i es el ángulo de incidencia del haz de luz del láser, θ_r es el ángulo de reflexión del haz dentro de la fibra óptica. Si $\theta_i = \theta_a$ entonces [21]:

$$n_0 \sin \theta_i = n_1 \cos \phi_c = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \quad (1.9)$$

En donde $n_0 \sin \theta_i$ se la conoce como la apertura numérica (*NA, Numerical Aperture*).

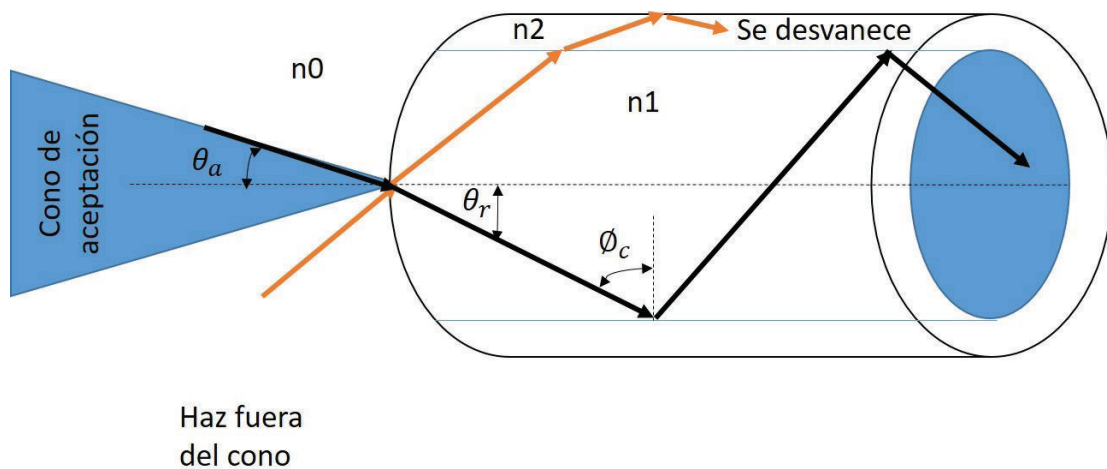


Figura 1. 10 Propagación en la fibra óptica [22]

Por otra parte, la mejora en la fabricación de la fibra óptica y el uso de diferentes longitudes de onda de trabajo, lograron reducir la atenuación desde 1000 dB/Km hasta 0.01 dB/km, lo que ha permitido mejorar los sistemas actuales de transmisión ópticos y brindar velocidades en el orden de los Tb/s [21].

1.2.2 FIBRA ÓPTICA MULTIMODO

La fibra óptica monomodo permite transmitir un haz de luz estrecho ya que el diámetro de su núcleo es pequeño alrededor de $10 \mu m$. Sin embargo, es difícil la conectorización por lo que se requiere incrementar el diámetro, como consecuencia ya no solo se transporta un haz de luz sino varios haces o modos (*MMF, Multimode Fiber*); esto conlleva a que no todos los haces de luz lleguen al receptor al mismo tiempo produciendo que el pulso transmitido se ensanche, lo que conduce a la interferencia inter símbolo (ISI) como se muestra en la Figura 1.11 (a).

A este fenómeno se lo conoce como dispersión modal, con el fin de mitigar la dispersión modal se generaron fibras ópticas de índice gradual, la misma que permite que la luz tenga que refractarse de manera gradual, de esta manera los

diferentes haces de luz convergen en puntos determinados al interior de la fibra como se indica en la figura 1.11 (b), reduciendo la dispersión modal.

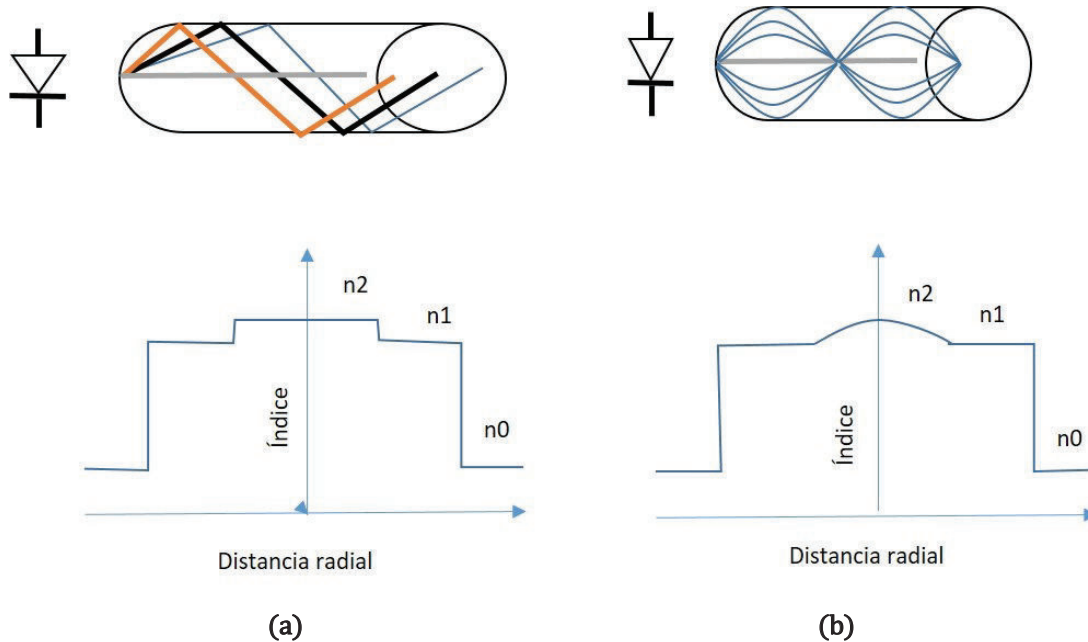


Figura 1. 11 Perfiles de propagación en la fibra óptica multimodo. (a) Paso. (b) Gradual. [21]

La capacidad de la fibra óptica multimodo se refleja en el producto distancia-ancho de banda (BL , *bandwidth length*) que está dado por [21]:

$$BL < \frac{n_2 c}{n_1^2 \Delta} \quad \text{Índice paso} \quad (1.10)$$

$$BL < \frac{8c}{n_1 \Delta^2} \quad \text{Índice gradiente} \quad (1.11)$$

Donde n_1 , n_2 son los índices del revestimiento y el núcleo respectivamente, $\Delta = n_1 - n_2$ es la variación en los índices de refracción y c es la velocidad de la luz.

Otra técnica para reducir la dispersión modal es mediante el control del haz de luz que incide en la fibra óptica denominado lanzamiento restringido de modo (*RML*, *Restricted Mode Launch*), que mueve algunos micrómetros el haz de luz del centro

de fibra óptica, esto hace que se propaguen modos superiores cuyos retardos son muy similares incrementando el producto distancia ancho de banda.

1.2.3 FIBRA ÓPTICA DE POCOS MODOS

La convencional MMF soporta centenas de modos y cada modo viaja a diferentes velocidades y en diferentes grupos, estos modos son la solución a la ecuación de onda dada por [21]:

$$\nabla^2 E + n^2(\omega)k_0 E = 0 \quad (1.12)$$

$$k_0 = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (1.13)$$

Donde ∇ es la divergencia, E es la evolvente de la onda del campo óptico, k_0 es el número de onda, c es la velocidad de la luz, ω es la frecuencia de oscilación del campo óptico y λ es la longitud de onda en el vacío.

Asumiendo el carácter de cilindro perfecto de la fibra óptica, la ecuación de onda puede ser escrita en coordenadas cilíndricas para una fibra óptica de índice paso y radio a como en [21]:

$$\frac{\partial^2 E_z}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial E_z}{\partial \rho} + \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2 E_z}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 E_z}{\partial z^2} + n^2 k_0^2 E_z = 0 \quad (1.14)$$

$$n = \begin{cases} n_1; & \rho \leq a \\ n_2; & \rho > a \end{cases} \quad (1.15)$$

Donde E_z es la evolvente del campo óptico en la dirección de la coordenada z , esta coordenada es la dirección de propagación de la onda, ρ es la coordenada radial y ϕ es la coordenada azimutal, las soluciones a esta ecuación puede ser escrita como el producto de tres soluciones por su simetría cilíndrica, así $E_z(\rho, \phi, z) = F(\rho)\Phi(\phi)Z(z)$, donde $F(\rho)$ representa la solución a la distribución del campo óptico, $\Phi(\phi)$ representa la solución a la distribución de la fase de la onda propagada y $Z(z)$

representa la solución de la propagación del campo óptico, lo que nos lleva a las siguientes ecuaciones diferenciales:

$$\frac{d^2 Z}{dz^2} + \beta^2 Z = 0 \quad (1.16)$$

$$\frac{d^2 \Phi}{d\phi^2} + m^2 \Phi = 0 \quad (1.17)$$

$$\frac{d^2 F}{d\rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{dF}{d\rho} + \left(n^2 k_0^2 - \beta^2 - \frac{m^2}{\rho^2} \right) F = 0 \quad (1.18)$$

La ecuación 1.16 representa la variación de la propagación de la onda a lo largo de la fibra, la ecuación 1.17 representa la variación de la fase de la onda propagada y la ecuación 1.8 representa variación de la distribución del campo. Las soluciones a estas ecuaciones diferenciales ordinarias, asumiendo que es una fibra óptica débilmente acoplada, son [21]:

$$Z = \exp(i\beta z) \quad (1.19)$$

$$\Phi = \exp(im\phi) \quad (1.20)$$

$$F(\rho) = \begin{cases} AJ_m \left(\sqrt{n^2 k_0^2 - \beta^2} \cdot \rho \right) = AJ_m(p\rho) \\ Ck_m \left(\sqrt{\beta^2 - n^2 k_0^2} \cdot \rho \right) = Ck_m(q\rho) \end{cases} \quad (1.21)$$

Por lo tanto, la solución general es [21]:

$$E_z = \begin{cases} AJ_m(p\rho) \exp(im\phi) \exp(i\beta z); \rho \leq a \\ Ck_m(q\rho) \exp(im\phi) \exp(i\beta z); \rho > a \end{cases} \quad (1.22)$$

Donde A y C son constantes, β es la constante de propagación de la onda y J_m , k_m son diferentes funciones de Bessel que dependiendo de la función de Bessel escogida para la solución, diferentes modos de la onda electromagnética se propagan, estos pueden ser: modos transversos eléctricos (TE), transversos

magnéticos (TM) o si se toma en consideración que la onda se propaga de manera oblicua se propagan una combinación de los campos eléctrico (E) y magnético (H), así se tienen los modos HE y EH; por facilidad de representación y simplificación se usan los modos linealmente polarizados (*LP, Linear Polarization*) los cuales agrupan varios de estos modos que tiene similar constante de propagación. En la Figura 1.12 se muestra esta relación de los modos exactos y los LP [22].

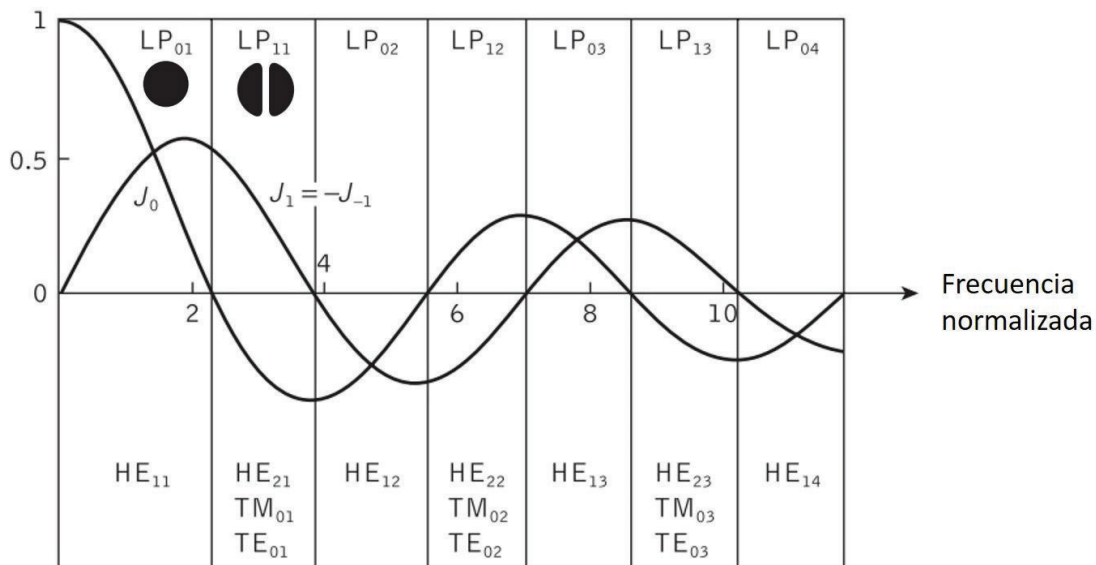


Figura 1. 12 Relación entre los modos de propagación [22]

Debido a que los diferentes grupos tienen diferentes constantes de propagación β , se tiene un retardo de grupo de modo diferencial (*DMGD, Differential Mode Group Delay*) y entre más grupos se propaguen en la fibra se tendrá una alta dispersión modal, lo que no la hace adecuada para enlaces de largo alcance, ya que el procesamiento digital de la señal (*DSP, Digital Signal Processing*) es muy alto [23]. Por lo tanto, el tener pocos modos propagándose en la fibra óptica permite tener un mejor desempeño en la transmisión, así la FMF tiene pocos modos guiados bien definidos entre 2 y 6, en la Figura 1.13 se presenta el esquema de una fibra óptica en la cual se propagan dos modos, en la figura se representa el modo fundamental LP_{01} (a) y el modo degenerado LP_{11} (b).

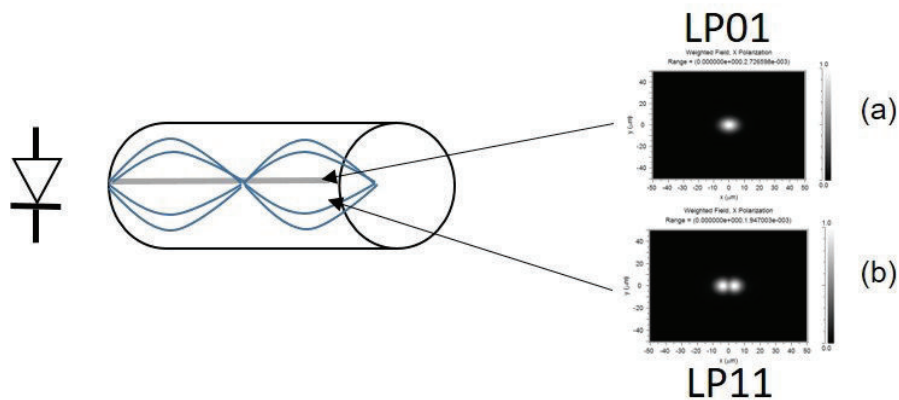


Figura 1. 13 Propagación de dos modos. (a) LP01. (b) LP11. [24]

El DMGD puede ser reducido con el diseño adecuado del índice y perfil del núcleo e incluso eliminado cuando se usa fibras combinadas de signos opuestos de DMDGD [25] [26] [27] [28], logrando transmisiones mayores a 1000 km con una apropiada amplificación [20] lo que la hace útil en cualquier segmento de la red.

También existe una interacción entre los diferentes modos y estos modos se mezclan en la fibra óptica debido al acoplamiento modal, si este es débil (régimen débilmente acoplado) el número de modos es restringido y el DMGD es alto, si por el contrario, éste es fuerte (régimen fuertemente acoplado) el número de modos se incrementa y el DMGD es bajo. En el primero, un sistema de transmisión convencional sin procesamiento digital de señales puede ser usado en el receptor, disminuyendo así su complejidad [29]; sin embargo, si el crosstalk es muy grande debido DMGD no se puede recuperar la señal sin usar técnicas de ecualización MIMO [30]. En el segundo, la complejidad del DSP en el receptor se incrementa debido al incremento en la dimensionalidad del ecualizador MIMO (incremento del número de modos) , pero también se reduce el número de taps requeridos en el ecualizador MIMO debido al bajo DMGD [31]. Por lo tanto, trabajar en un sistema con bajo DMGD y en un régimen de bajo acoplamiento es deseable, aunque, el crosstalk que resulta del acoplamiento no ortogonal en: el transmisor, receptor, moduladores, demoduladores, conectores, micro curvaturas y por el retorcimiento de la fibra hacen que este sistema sea impráctico [32], debido a las muchas restricciones que tendrían cada uno de los componentes del sistema óptico, respecto a su acoplamiento.

1.3 SISTEMAS DE MÚLTIPLES ANTENAS

El incremento de las aplicaciones en tiempo real sobre los sistemas inalámbricos en la última década ha llevado a buscar nuevas técnicas para sobrellevar el cuello de botella de la capacidad. Para ello, se ha propuesto el uso de varias antenas tanto en el transmisor como en el receptor que permita mejorar la calidad de la señal y la velocidad de transmisión del sistema. En la práctica, los sistemas inalámbricos de banda ancha con una sola antena requieren más espectro, el mismo que puede ser impráctico o muy costoso, además, no requieren línea de vista por lo que incluyen muchos impedimentos tales como desvanecimiento de la señal tanto en tiempo como en frecuencia [33].

1.3.1 SISTEMA MIMO

Un sistema de múltiples entradas y múltiples salidas (MIMO), se compone de varias antenas en el transmisor y varias antenas en el receptor con el objetivo de incrementar la capacidad del sistema inalámbrico como se muestra en la Figura 1.14. También existen sistemas de una sola entrada (una antena) en el transmisor y múltiples salidas (varias antenas) en el receptor (*SIMO, Single Input Multiple Output*) y sistemas de varias entradas en el transmisor y una sola salida en el receptor (*MISO, Multiple Input Single Output*) [34].

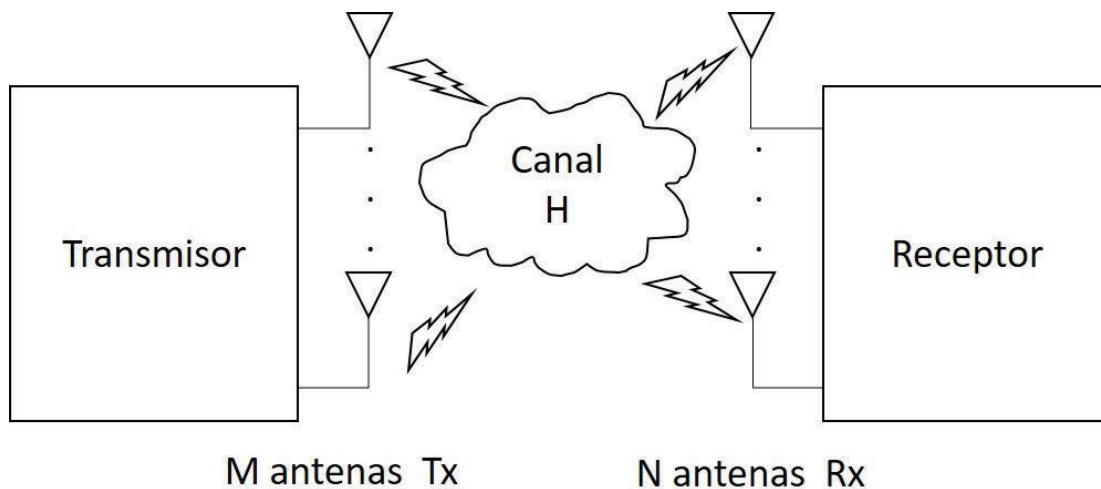


Figura 1. 14 Sistema MIMO [34]

La ventaja de usar varias antenas se ve reflejado en la mejora del desempeño del sistema inalámbrico, logrado a través de la diversidad y un incremento en la velocidad de transmisión gracias a la multiplexación espacial. La información es

enviada a través de las diferentes antenas mediante la multiplexación espacial, esta al atravesar el canal de comunicaciones se ve afectada severamente tanto en frecuencia como en tiempo. Sin embargo, como se tiene un sistema multitrayecto y varias señales transmitidas con redundancia tanto en tiempo como en frecuencia, no es muy probable que se afecten a todas al mismo tiempo, subiendo la posibilidad de que esta información llegue correctamente a cualquiera de las antenas receptoras.

EL sistema MIMO puede ser describirse matemáticamente como [34]:

$$Y = HX + W \quad (1.23)$$

Donde Y es la señal recibida por las antenas en el receptor, X la señal enviada por las antenas en el transmisor, H es la matriz del canal de transmisión y W es el ruido del canal que se supone lineal e invariante en el tiempo.

Entonces, la capacidad de un sistema MIMO puede expresarse así [33]:

$$C = \log_2 \left[\det \left(I_M + \frac{\rho}{W} HH^* \right) \right] \quad (1.24)$$

En la cual C es la capacidad, I_M es la matriz identidad, ρ es la relación señal a ruido y $(^*)$ es la operación transpuesta conjugada. De esta expresión, se puede observar que la capacidad crece conforme se incrementa el número de antenas.

1.3.2 CÓDIGO ESPACIO TEMPORAL DE ALAMOUTI

El uso de varias antenas en un sistema de transmisión puede ser usado generalmente de dos maneras, la primera para incrementar la capacidad del sistema y la segunda para tener ganancia en diversidad. Si lo que se desea es maximizar la capacidad del sistema se envían diferentes e independientes flujos de datos a cada antena, a este tipo de sistemas se los conoce como códigos espacio temporales (*STC, Space Time Code*), por el contrario, si se desea que la información vaya redundante por cada una de las antenas y reducir así la probabilidad de corte del sistema, se usan los sistemas códigos bloques espacio temporales (*STBC, Space Time Block Code*), estos no incrementan directamente

la capacidad del sistema. El problema de los sistemas con STC es que requieren en el receptor algoritmos complejos de decodificación como por ejemplo el de Viterbi [35], por el contrario, los sistemas con STBC requieren un simple procesamiento lineal teniendo la misma ganancia en diversidad que los STC. En la Figura 1.15 se muestra un sistema STC.

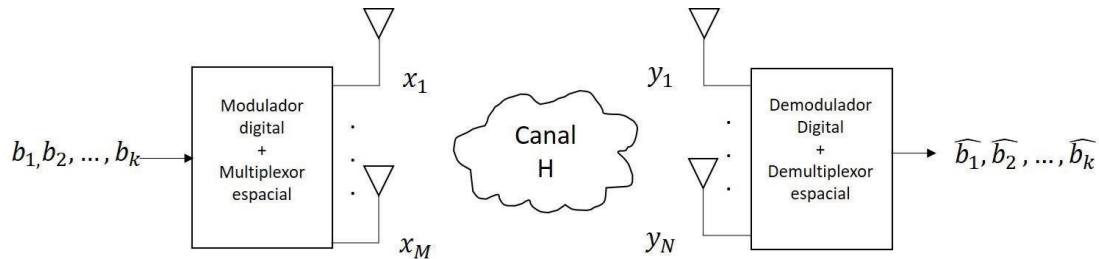


Figura 1. 15 Sistema STC [34]

Uno de los sistemas STBC más simples es el propuesto por Alamouti en 1998 [36], en el cual propone un esquema de codificación para un sistema con dos antenas transmisoras y una receptora, el mismo que puede ser generalizado a N número de antenas receptoras. Este esquema de codificación para dos antenas transmisoras y dos antenas receptoras se resume en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1 Codificación espacio temporal Alamouti

ranura de tiempo	Antena 1	Antena 2
t_1	x_1	x_2
t_2	$-x_2^*$	x_1^*

En esta se observa que los símbolos x_1 y x_2 son transmitidos por las dos antenas al tiempo t_1 y al tiempo t_2 se envía la misma información usando símbolos ortogonales $-x_2^*$ y x_1^* se asume que el canal permanece constante en estos dos intervalos de tiempo, por lo cual la codificación espacio temporal se hace evidente. En la Figura 1.16 se presenta el diagrama de bloques de un sistema MIMO con la codificación de Alamouti.

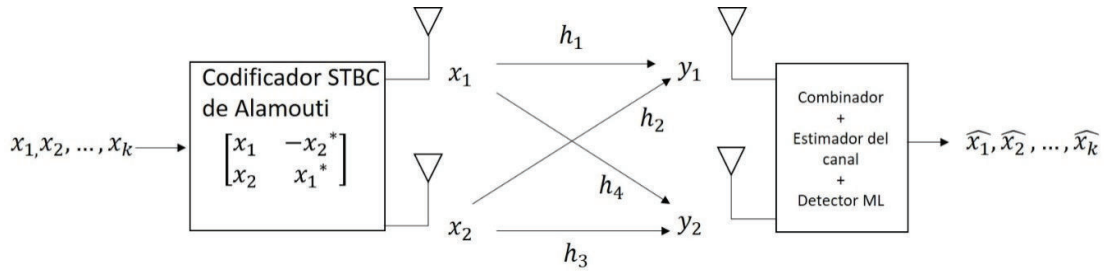


Figura 1. 16 Sistema STBC [37]

Haciendo referencia a al esquema anterior en el receptor se tendría [37]:

Primera ranura de tiempo:

$$y_1 = h_1 x_1 + h_2 x_2 + w_1 \quad (1.25)$$

$$y_2 = h_4 x_1 + h_3 x_2 + w_2 \quad (1.26)$$

Segunda ranura de tiempo:

$$y_1 = -h_1 x_2^* + h_2 x_1^* + w_3 \quad (1.27)$$

$$y_2 = -h_4 x_2^* + h_3 x_1^* + w_4 \quad (1.28)$$

En las cuales w_1, w_2, w_3, w_4 es el ruido introducido por el canal de comunicaciones. Finalmente, los símbolos estimados en el detector de máxima verisimilitud (ML, Maximum Likelihood) estarán dados por las siguientes expresiones:

$$\hat{x}_1 = h_1^* y_1 + h_2 y_2^* + h_3^* y_3 + h_4 y_4^* \quad (1.29)$$

$$\hat{x}_2 = h_1^* y_1 - h_2 y_2^* + h_3^* y_3 - h_4 y_4^* \quad (1.30)$$

Como se puede observar, en el receptor se pueden estimar los símbolos recibidos con solo una combinación lineal de las señales que llegan a las antenas, reduciendo la complejidad del mismo y por lo tanto su costo.

CAPÍTULO 2

ARQUITECTURA Y MODELO DE SIMULACIÓN

En este capítulo se presenta el estado del arte de los sistemas OFDM y FOFDM en sistemas ópticos que usan fibra óptica de pocos modos, también se dará a conocer la arquitectura del sistema propuesto mediante diagramas de bloques y el modelo de simulación de la fibra óptica de pocos modos implementado, que en conjunto permitirán realizar la comparación del desempeño de los sistemas OFDM y FOFDM.

2.1 ESTADO DEL ARTE DE SISTEMAS MULTIPORTADORA OFDM Y FOFDM EN FIBRA ÓPTICA DE POCOS MODOS

El continuo crecimiento de los servicios de telecomunicaciones como la telefonía, video analógico, video digital de alta definición e internet, ha obligado al incremento de la capacidad de las redes que soportan estos servicios [38]. Más aún, el uso de técnicas eficientes para el transporte de la información se hace necesario, así OFDM surge como una técnica eficiente para la transmisión de señales inalámbricas ya que usa una gran cantidad de subportadoras que llevan símbolos complejos modulados digitalmente, lo que incrementa la capacidad de los sistemas, además, al estar estas subportadoras solapadas permite tener una mayor eficiencia espectral [39]; también el uso de la FFT como generadora de las subportadora permite una implementación de bajo costo en sistemas en tiempo real, todas estas características la han llevado a ser empleada en casi todas las tecnologías de sistemas de radio tradicionales [40].

En los últimos años, la reducción del espectro radioeléctrico disponible para dar servicios de banda ancha, ha obligado al desarrollo de nuevas técnicas de modulación más eficientes espectralmente. Rodríguez y Darwazhe, en el 2002 proponen una nueva técnica de modulación que utiliza la mitad del ancho de banda que una señal OFDM [41], así también, se propone el uso de la fibra óptica para proveer múltiples servicios de banda ancha al usuario haciendo uso de las denominadas redes ópticas pasivas (Passive Optical Networks) [42]–[44]. Sin embargo, el uso de técnicas multiportadoras en la fibra óptica supone varios retos

debido a las características especiales de esta, frente a los sistemas inalámbricos y de cobre tradicionalmente usados.

Por otro lado, la fibra óptica monomodo está llegando a su límite de capacidad lo cual se prevé sea en el 2025, es lo que se ha denominado el “capacity crunch” [12], para sobrellevar este problema se ha vuelto la mirada a las fibras multimodo y a la creación de nuevas fibras ópticas, entre ellas FMM, la que permite transportar información en modos bien definidos [14]. Todo este conjunto de premisas ha hecho que los investigadores trabajen en busca de soluciones a la convergencia de los sistemas de radio y fibra óptica.

Zhao y otros proponen el uso FOFDM en sistemas ópticos usando SMF [6], en esta el desempeño de sistemas OFDM (QPSK, 16QAM) y FOFDM (BPSK y 4ASK) se evalúan mediante simulación numérica, demostrando que FOFDM tiene mejor desempeño respecto al BER y que tienen igual desempeño respecto a la dispersión cromática.

Luego proponen la primera implementación de FOFDM y se demuestra la posibilidad de alcanzar 14.348 Gb/s en BPSK-FOFDM [8]. Sin embargo, FOFDM presenta el problema de requerir el uso de DCT, la cual solo trabaja con modulaciones digitales reales y más aún, es más compleja que DFT ya que usa la transformada de Hilbert, para resolver este problema en [45] se propone una nueva DFT que logra el mismo desempeño que la DCT para FOFDM, Yang y otros, demuestran que FOFDM en su versión de doble banda lateral (DSB-FOFDM) es la misma QAM [46] ya que la amplitud y fase de la señal son independientes en el intervalo de símbolo, esto permite tener modulaciones complejas en FOFDM; en [11] se propone un esquema que transmite 16-QAM FOFDM en una transmisión simulada de 10Gb/s, separando la parte real e imaginaria mediante un interleaving, subiendo en frecuencia la parte imaginaria, no usando la DCT si no la FFT y ajustando el parámetro de separación de las portadoras a la mitad para que se comporten como FOFDM.

Debido al reducido ancho de banda de FOFDM se ve como una alternativa a usar sobre fibras ópticas MMF, ya que, estas presentan limitaciones en su ancho de banda por la dispersión modal así en [47] se presenta la implementación en 500 m de MMF para actualizar redes de 10Gb/s, logrando hasta 19.375Gb/s con 16-ASK con igual desempeño que OFDM pero mejor eficiencia espectral. En [10] se evalúa

el impacto que tiene los convertidores analógico digital y digital analógico sobre las señales OFDM y FOFDM en fibras ópticas SMF y MMF mostrando que tiene un comportamiento similar para un BER de 10^{-3} , de igual manera en [48] se hace una extensiva comparación de estas modulaciones multiportadora con respecto a modulación en intensidad y detección directa (IM-DD), consiguiendo para 20Gb/s a 500m de MMF y a 50Km de SMF un recorte de ~ 1 dB y en [49] se consigue experimentalmente 3.9 Gb/s a 300 m de MMF, confirmándose el mejor desempeño de FOFDM. En [50] se analiza el efecto de la interferencia interportadora para OFDM y FOFDM, mostrando que FOFDM (4-ASK) es seis veces más tolerante que OFDM (16-QAM) con respecto al offset residual de frecuencia. En [51] se presenta un análisis comparativo del PAPR (Peak-to-Average Power Ratio) de OFDM y FOFDM encontrándose que no hay diferencias significativas entre ambas modulaciones.

Con la creación de las nuevas fibras FMF se evalúa el comportamiento de OFDM en ellas, así en [52], [24] se logra 107 Gb/s en una fibra óptica TMF usando los modos no degenerados LP01 y LP11 y en [53] se consigue 35.3 Gb/s usando los modos degenerados LP11a y LP11b a 4.5 km y 26 km respectivamente. En [54] [55] se evalúa la complejidad de los algoritmos de procesamiento digital de señales y ecualización para OFDM en fibra ópticas FMF, observando que OFDM necesita mayor procesamiento al usar ecualización ciega y no es práctica para sistemas de largo alcance, por lo que se recomienda reducir el retardo modal. En [56] se confirma que con una fibra óptica TMF (LP01,LP11a,LP11b) de bajo retardo de modo diferencial se logra 560 Km a 402 Gb/s 3MDM-PM-QPSK-OFDM; una reducción de la complejidad del DSP se logra en [57] demostrando 337.5 Gb/s MDM-8QAM-OFDM en 130 km de FMF.

Una comparación de OFDM (8-PSK,16-QAM) entre las fibras de dos núcleos (*TCF, Two Core Fiber*) y de dos modos TMF se realiza en [58] para 100 km de distancia, resultando que la fibra de dos modos tiene mejor desempeño en casi 3 dB. Recientemente, se han propuesto nuevos esquemas de redes PON basados en FMF [59], que incluyen estándares nuevos como NG-PON 2 [60] o fibras ópticas híbridas que tienen varios núcleos de FMF [61].

De la revisión del estado del arte y de nuestro conocimiento, no se encuentra una comparación de OFDM y FOFDM en la fibra óptica de pocos modos, misma que es necesaria para el desarrollo de los sistemas ópticos futuros.

2.2 ARQUITECTURA DEL SISTEMA

El sistema de transmisión de radio sobre fibra óptica de pocos modos que fue propuesto para la transmisión de OFDM y FOFDM está compuesto por un generador de secuencias binarias pseudo-aleatorias (*PBRs*, *Pseudo Binary Random Sequence*), las cuales pasan luego a un modulador digital que las mapea hacia símbolos de tipo BPSK, QPSK y 16QAM, entonces, los símbolos son codificados mediante el código espacio temporal de Alamouti y separados en dos flujos que ingresan a los moduladores OFDM y FOFDM; estos generan la señales inalámbricas multiportadoras, que son inyectadas en la fibra óptica FMF, en su versión de dos modos (TMF), mediante dos moduladores en intensidad; los cuales están conectados a una fuente laser multimodo que emite dos modos el modo LP01 y el modo LP11, estos son multiplexados mediante un multiplexor modal el cual está conectado a la FMF, como se indica en la Figura 2.1.

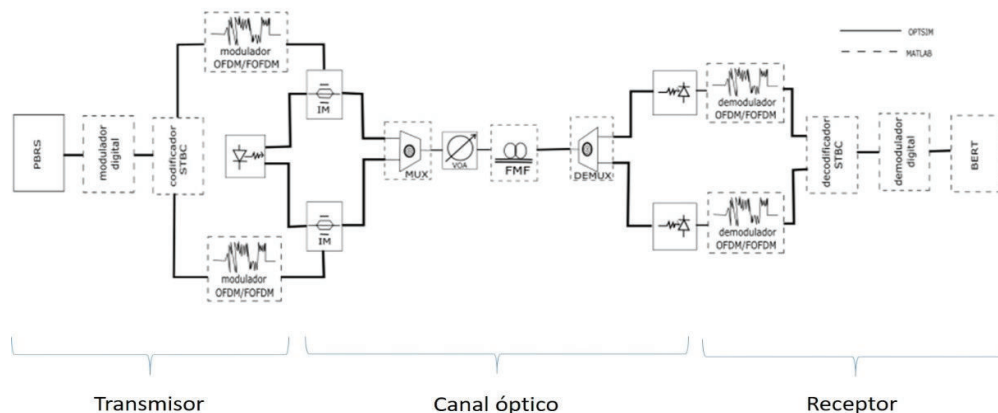


Figura 2. 1 Esquema de transmisión propuesto

El sistema receptor está formado por un demultiplexor modal que separa los modos LP01 y el modo LP11, esta señal óptica es detectada mediante dos fotodetectores, que hacen la conversión óptica/eléctrica de las señales OFDM/FOFDM recibidas, las mismas que son demoduladas mediante los demoduladores OFDM/FOFDM, que entregan los símbolos recibidos al decodificador STBC, el cual estima los símbolos transmitidos para que sean demodulados digitalmente y posteriormente realizar la

medición del desempeño del sistema usando EVM ¹ y el factor Q^{2 2} en el módulo BERT.

2.3 CANAL ÓPTICO DE POCOS MODOS

Para la implementación del modelo matemático se realizó un análisis de dos modelos ampliamente utilizados en la simulación de sistemas basados en fibra óptica de pocos modos, como son: el modelo de propagación no lineal de fibra óptica bimodal [62] y el modelo no lineal semi-analítico [63]. Para ello se tomó en consideración la aproximación numérica que se utilizará al implementar el modelo, los parámetros de la fibra óptica que el modelo toma en consideración y el alcance de este trabajo. La Tabla 2.1 resume este análisis.

Tabla 2.1 Comparación de modelos de simulación para FMF

Parámetros	Bimodal	Semi-analítico	Alcance de los objetivos de la tesis
Aproximación numérica	Split Step Fourier	Split Step Fourier	si
Simulación numérica	Completa	Parcial	si
Considera parte lineal	si	si	si
Considera parte no lineal	si	si	si
Considera acoplamiento lineal	no	no	no
Considera acoplamiento no lineal	si	si	si
Considera micro curvaturas	no	si	no

¹ EVM se basa en la raíz media cuadrática de los vectores error obtenido de los símbolos recibidos en la constelación de la modulación digital y es expresada en porcentaje.

² Q2 se basa en la división de la media y la varianza de los puntos en la constelación de los símbolos recibidos

De este análisis se desprende que los dos modelos son muy parecidos, pero el modelo semi-analítico es más completo ya que incorpora el efecto de las micro curvaturas de la fibra óptica. Sin embargo, al ser un modelo semi-analítico su simulación numérica es parcial y tomando en consideración que el efecto de las micro curvaturas de la fibra óptica esta fuera del alcance de este trabajo, pero si el de simulación numérica completa debido a la co-simulación con Optsim, entonces, se eligió el modelo de propagación no lineal de fibra óptica bimodal para ser implementado.

2.3.1 MODELO NUMÉRICO DE PROPAGACIÓN NO LINEAL DE FIBRA ÓPTICA BIMODAL

La fibra óptica de pocos modos puede ser modelada mediante una aproximación a la ecuación no lineal de Schrödinger acoplada (CNLSE), la ecuación de propagación del campo complejo $A_p(z, t)$ para cada modo es [64]:

$$\frac{\partial A_p(z, t)}{\partial z} = L^{(p)}(z, t) + N^{(p)}(z, t) \quad (2.1)$$

La ecuación 2.1 es separada en la parte lineal $L^{(p)}$ y no lineal $N^{(p)}$, las partes son resueltas separadamente mediante un paso Δz a lo largo de la fibra óptica. La parte lineal está representada por [64]:

$$L^{(p)} = \frac{-\alpha^2}{2} A_p - \left(\beta_1^{(1)} - \beta_1^{(p)} \frac{\partial A_p}{\partial t} - \frac{i\beta_2^{(p)}}{2} \frac{\partial^2 A_p}{\partial t^2} \right) \quad (2.2)$$

Esta ecuación describe los fenómenos lineales que ocurren en la fibra óptica como atenuación (α), dispersión de la velocidad de grupo (β_2) y retardo de grupo en modo diferencial ($\beta_1^{(1)} - \beta_1^{(p)}$). La parte no lineal está dada como [64]:

$$N^{(p)} = -i \sum_{q=1}^N \gamma_{pq} \left(\frac{2}{3} A_p |A_q|^2 + \frac{1}{3} A_p^* A_q^2 \right) \quad (2.3)$$

$$N^{(p)} = -i \left[\sum_{q=1}^N \gamma_{pq} |A_q|^2 \right] A_p + i \sum_{q=2}^N \frac{\gamma_{pq}}{3} (|A_q|^2 A_p - A_q^2 A_p^*) \quad (2.4)$$

Donde A_p , A_q son los modos del campo óptico transmitiéndose por la fibra óptica y γ_{pq} es el coeficiente no lineal de los modos incluyendo su interacción. Esta ecuación describe la interacción que existe entre cada uno de los modos debido a los fenómenos del efecto Kerr (SPM³, XPM⁴, FWM⁵). Esta puede ser aproximada y resuelta mediante la solución [64]:

$$A(z + \Delta z) = \exp(M) \cdot A \quad (2.5)$$

Donde M es una matriz MXN que contiene todos los términos no lineales intermodales e intramodales.

2.3.2 VALIDACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO

El modelo de propagación no lineal de fibra óptica bimodal descrito anteriormente se implementó en el software de simulación numérica Matlab versión 2009 b.

La validación del modelo se realizó mediante la simulación de dos modos, el LP01 (modo 1) y el LP11 (modo 2), en los cuales se ingresó pulsos ópticos gaussianos, los cuales son ampliamente usados por la comunidad científica para verificar el comportamiento de la fibra óptica ya que sus respuestas son ampliamente esperadas y documentadas [21], uno por cada modo de propagación, para ello se procedió a separar la validación de la parte lineal y no lineal y observar si el comportamiento era el esperado para cada una de ellas conforme se variaban los parámetros de simulación. En primer lugar, se procedió a validar la atenuación introducida por la fibra óptica, para ello se ingresó un pulso óptico gaussiano de 0 dBm de potencia durante 1 km de FMF simulando una atenuación de 3 dB/Km, bajo

³ SPM: Self Phase Modulation es el efecto no lineal de una fibra óptica en el cual el pulso se ve afectado por sí mismo al propagarse por la fibra óptica.

⁴ XPM: Cross Phase Modulation es el efecto no lineal de la fibra óptica en la cual un pulso afecta a otro co-propagante en la fibra óptica.

⁵ FWM: Four Wave Mixing es el efecto no lineal de la fibra óptica que genera una nueva frecuencia a partir de otras tres co-propagantes en la fibra óptica

estas condiciones se espera que la potencia del pulso óptico se reduzca a la mitad, en la Figura 2.2 se observan los resultados de la simulación para el modo 1 (a) y para el modo 2 (b), coincidiendo con los resultados esperados ya que el pulso de salida (rojo) se atenúa a la mitad de la potencia que tiene el pulso óptico de entrada (azul), esto indica el adecuado funcionamiento de parámetro de atenuación en el algoritmo que ha sido implementado.

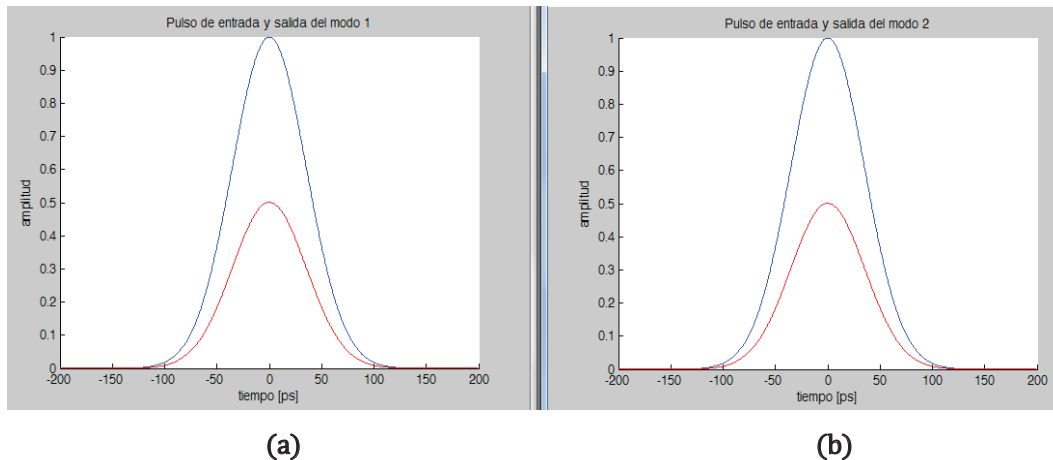


Figura 2. 2 Atenuación del modelo numérico a 3 dB/Km en 1Km. (a) Modo1. (b) Modo 2.

En segundo lugar, se procedió a verificar el retardo de grupo de modo diferencial (DMGD), el cual produce el retraso de los pulsos ópticos al atravesar la fibra óptica de pocos modos, para la simulación se tomó como referencia un retardo entre los dos modos $\beta_1^1 - \beta_1^2 = 2.1$ ps/km a una distancia de 100 km y no se consideró la atenuación en la fibra óptica, bajo estas nuevas condiciones el pulso óptico de salida del modo 2 debería retrasarse en 210 ps respecto al pulso óptico de entrada y en el modo 1 el pulso óptico no debería sufrir retraso, en la Figura 2.3 se observa que no existe retardo del pulso óptico de entrada respecto al de salida en el modo 1 (a) y que en el modo 2 (b) hay el retardo esperado del pulso óptico de salida respecto de su pulso óptico de entrada, esto indica el adecuado funcionamiento de los parámetros β_1^1 y β_1^2 que representan el retardo de grupo de modo diferencial para el modo 1 y para el modo 2 respectivamente en el algoritmo que ha sido implementado.

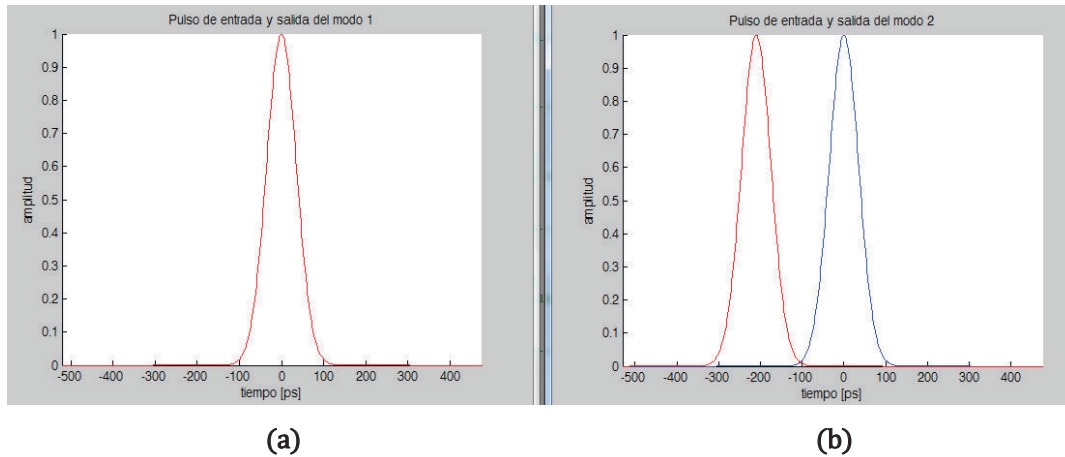


Figura 2. 3 DMGD del modelo numérico para 2.1 ps/km en 100 Km. (a) Modo1. (b) Modo 2

En tercer lugar, se procedió a validar la dispersión en la fibra óptica para cada uno de los modos, esta fue realizada usando un valor de dispersión $D = 17$ ps/nmkm para el modo 1 (a) y un valor de dispersión $D = 15$ ps/nmkm para el modo 2 (b), con una longitud de 100 Km de fibra óptica, en la Figura 2.4 se observa el ensanchamiento de los pulsos en ambos modos, efecto esperado de la dispersión de la fibra óptica, además, se ve como el pulso óptico se ensancha más en el modo 1 que en el modo 2 ya que tiene mayor dispersión.

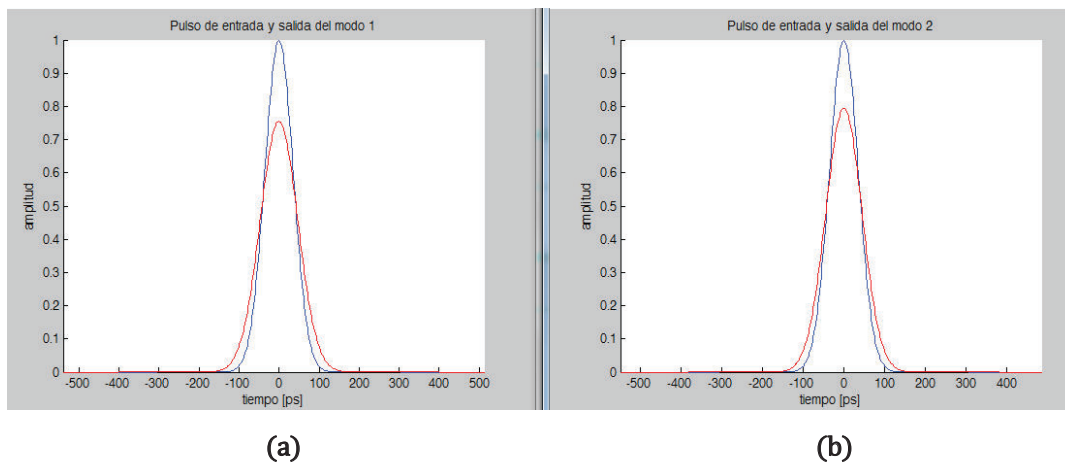


Figura 2.4 Dispersión del modelo numérico para 17 ps/nmKm . (a) Modo 1. (b) Modo 2

Finalmente, se realizó una simulación tomando en consideración todos los parámetros lineales de la fibra óptica de pocos modos con los valores antes mencionados, con el fin de validar toda la parte lineal, en la Figura 2.5 se muestra los pulsos resultantes sin retardo para el modo 1(a) y con retardo para el modo (2) producto del DMGD, atenuados por el parámetro de atenuación y ensanchados por la dispersión.

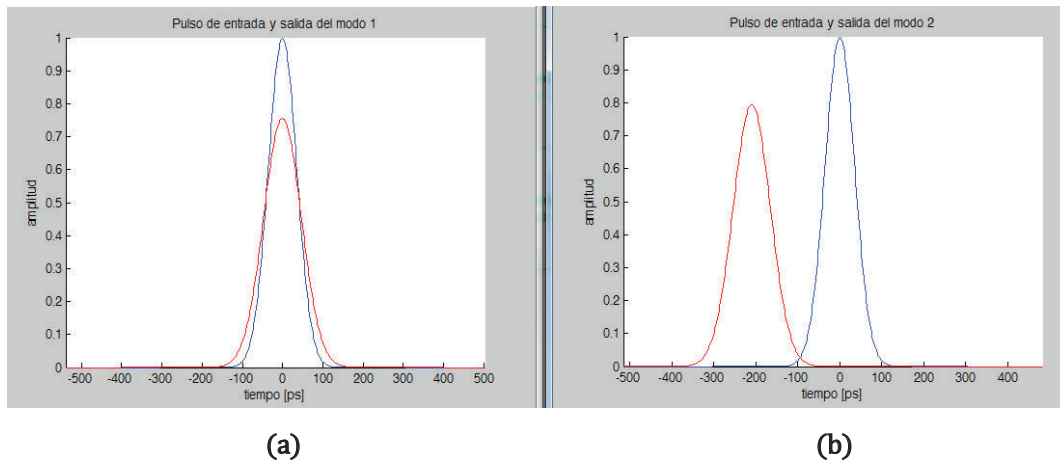


Figura 2.5 Validación de parte lineal del modelo numérico para FMF. (a) Modo 1. (b) Modo 2

Como se puede observar de las simulaciones realizadas, los valores coinciden con los esperados, ya sean simuladas por separado o en conjunto, con lo cual queda demostrado que la implementación del modelo numérico es adecuado en su parte lineal.

Para validar la parte no lineal del modelo se procedió a variar los parámetros de las constantes no lineales de acoplamiento tanto intramodal γ_{11}, γ_{22} como intermodal γ_{12}, γ_{21} . El acoplamiento intramodal hace que el pulso se afecte por sí mismo produciendo su deformación, debido a la rotación de fase de las componentes de frecuencia, en la simulación se usó $\gamma_{11} = \gamma_{22} = 0.4 [w \cdot km]^{-1}$ y $\gamma_{12} = \gamma_{21} = 0 [w \cdot km]^{-1}$, como era de esperarse los pulsos en el modo 1 (a) y en el modo 2 (b) se ven afectados por igual ya que en la simulación se usó un valor igual para ambos modos como se aprecia en la Figura 2.6, el grafico insertado en el lado izquierdo presenta la deformación del pulso de salida (rojo) respecto al pulso de entrada (azul).

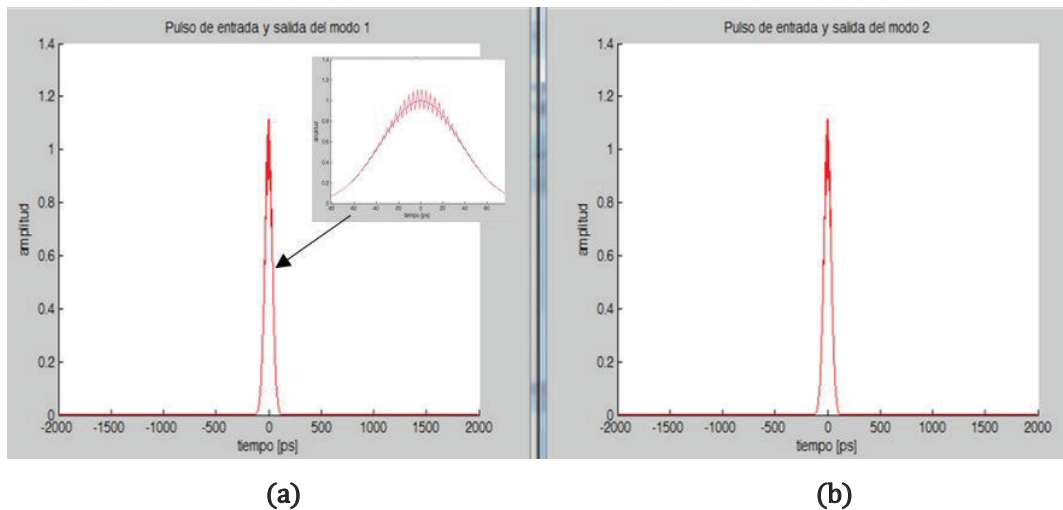


Figura 2. 6 Efecto del acoplamiento intramodal con $\gamma_{11} = \gamma_{22} = 0.4$. (a) Modo 1. (b) Modo 2

De similar forma se procedió a variar los parámetros de acoplamiento intermodal, el cual produce una afectación e intercambio de potencia entre los pulsos co-propagates, para la simulación se usaron los valores de $\gamma_{12} = 0.4$ $\gamma_{21} = 2$ $[w \cdot km]^{-1}$ manteniendo los parámetros de acoplamiento intramodal en $\gamma_{11} = \gamma_{22} = 0.4$ $[w \cdot km]^{-1}$. En la Figura 2.7, se indica el intercambio de potencia entre los pulsos del modo 1 (a) y el modo 2 (b), se observa el efecto del intercambio de potencia del modo 2 sobre el modo 1.

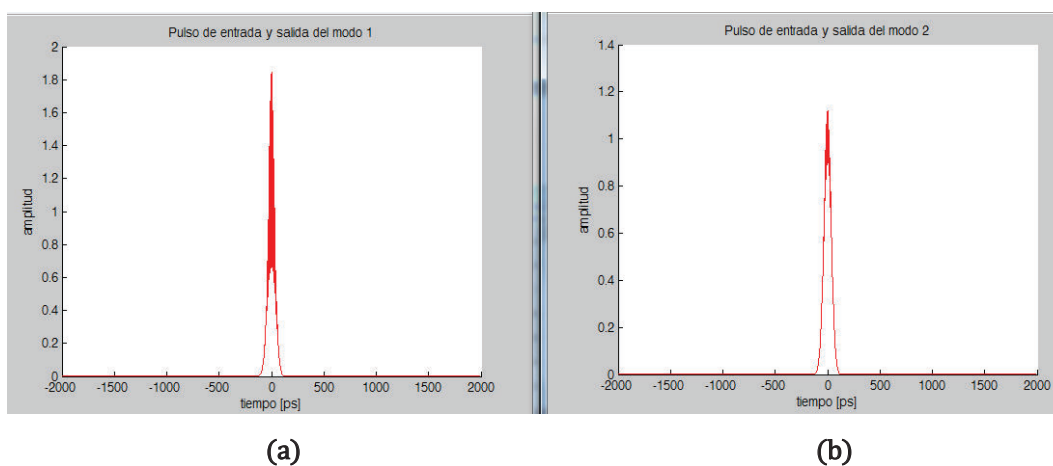


Figura 2. 7 Acoplamiento intramodal con $\gamma_{12} = 0.4$ $\gamma_{21} = 2$. (a) Modo 1. (b) Modo 2

En la Figura 2.8, se indica el intercambio de potencia que existe para el modo 1 (a) y el modo 2 (b), para los coeficientes no lineales $\gamma_{12} = 2\gamma_{21} = 0.4 [w \cdot km]^{-1}$ y $\gamma_{11} = \gamma_{22} = 4 [w \cdot km]^{-1}$, se observa el efecto del intercambio de potencia del modo 1 hacia el modo 2.

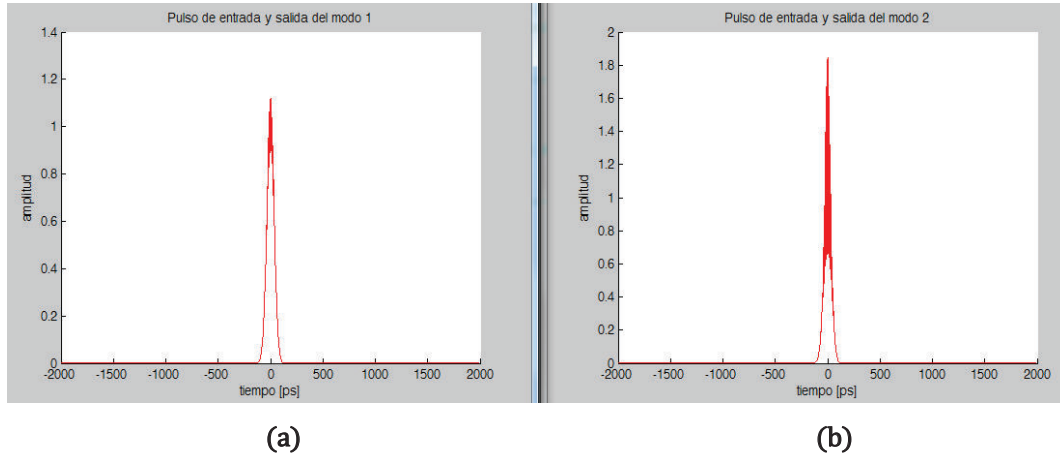


Figura 2. 8 Acoplamiento intramodal con $\gamma_{21} = 2\gamma_{21} = 0.4$. (a) Modo 1. (b) Modo 2

Como se observa en las dos últimas figuras, hay un intercambio de potencia, así como una afectación entre los dos modos, lo que era de esperarse de un acoplamiento modal, por lo tanto, esto indica que el modelo numérico en su parte no lineal es adecuado para las simulaciones.

Como parte de la validación de la parte no lineal del modelo se generaron pulsos aleatorios gaussianos a 10 Gb/s, despreciando los efectos lineales del canal y con los siguientes valores de los parámetros no lineales $\gamma_{11} = 1.15 [w \cdot km]^{-1}$, $\gamma_{22} = 0.98 [w \cdot km]^{-1}$, $\gamma_{12} = \gamma_{21} = 0.9 [w \cdot km]^{-1}$, los cuales fueron asumidos tomando en consideración una red de tipo XG-PON⁶. La Figura 2.9, muestra el resultado de la simulación para una transmisión XG-PON para el modo 1 (a) y el modo 2 (b) de un tren de pulsos para cada uno de los modos, en la figura solo se muestran dos para cada uno de ellos, se observa que los pulsos se ven afectados por el acoplamiento intramodal e intermodal ya que se encuentra deformados, aunque esta no es severa ya que los pulsos aún son distinguibles.

⁶ Es un estándar de las redes de acceso ópticas pasivas que trabaja a una velocidad de 10 Gb/s

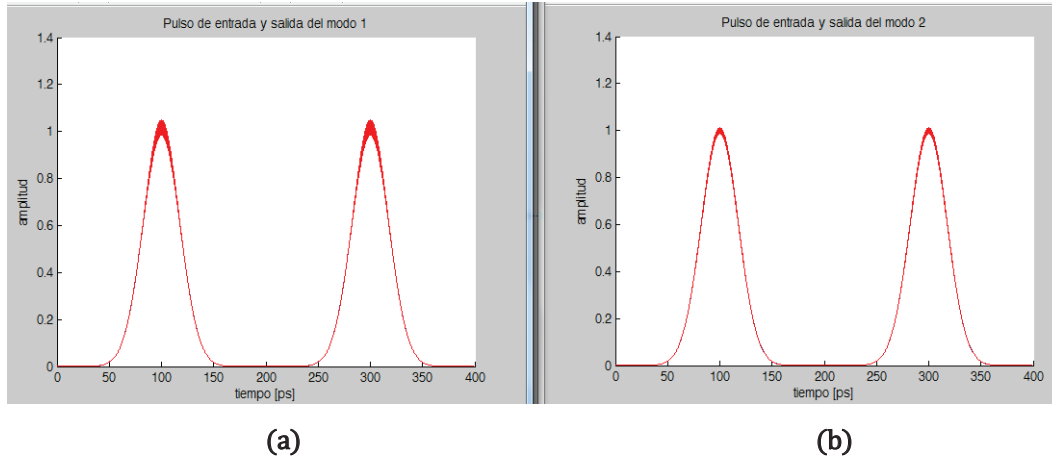


Figura 2. 9 Validación de la parte no lineal para XG-PON. (a) Modo1. (b) Modo 2

La afectación que produce el canal óptico en los pulsos gaussianos depende de los valores de acoplamiento intermodal e intramodal, en los pulsos del modo 2 se ve una afectación pequeña debido al acoplamiento intramodal ya que los pulsos del modo 2 están poco afectados por sí mismos. Sin embargo, se aprecia un mayor acoplamiento intermodal, en especial la interferencia que tienen los pulsos del modo 2 sobre los del modo 1, esto se observa en los pulsos del modo 1 ya que están más afectados; además no se observa ningún comportamiento de los parámetros de la parte lineal de la fibra óptica de pocos modos lo que corrobora que el algoritmo está trabajando adecuadamente.

Por otra parte, como consecuencia de que todos los pulsos que se propagan por la fibra de pocos modos tienen igual afectación por el acoplamiento, no es necesario analizar el comportamiento de todos los pulsos propagantes, al contrario bastaría con analizar el comportamiento del canal respecto de un pulso y luego generalizarlo, esto permitirá reducir el tiempo de simulación y la carga computacional del algoritmo lo que agilizará la co-simulación.

Tomando en consideración los resultados de las simulaciones realizadas tanto de la parte lineal como de la parte no lineal podemos afirmar que, el algoritmo implementado para simular la propagación de señales en la fibra óptica de pocos modos trabaja adecuadamente y puede ser utilizado en la co-simulación entre Matlab y Optsim.

CAPÍTULO 3

SIMULACIÓN DE LOS MODELOS DE TRANSMISIÓN

El sistema de transmisión se implementó en co-simulación entre el software de modelamiento numérico Matlab y el software de simulación de sistemas ópticos Optsim con su sub programa ModeSyS que permite el manejo de fibra óptica multimodo. La implementación se realizó tomando en consideración el esquema indicado en la Figura 2.1, con lo cual se obtuvo el esquemático implementado en Optsim como se indica en la figura 3.1.

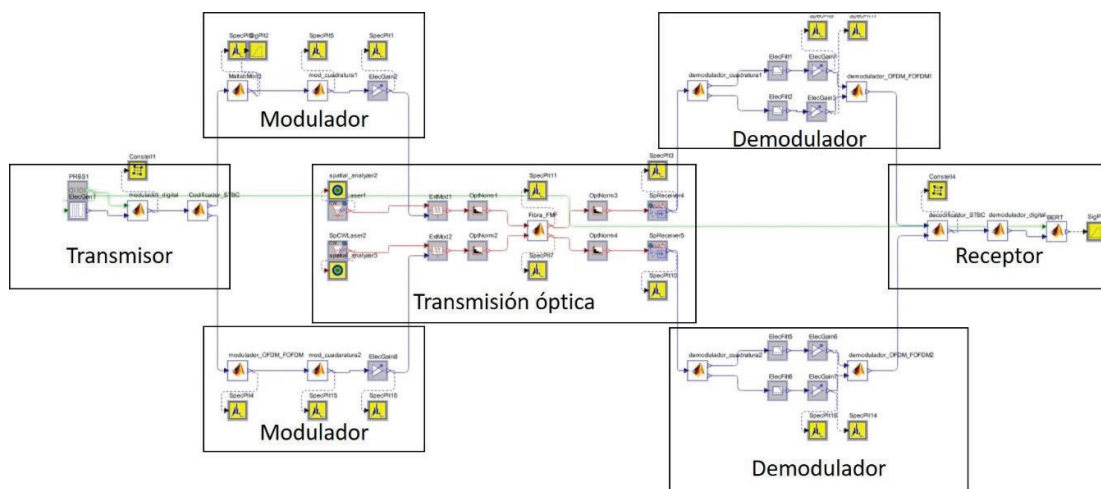


Figura 3. 1 Esquema implementado en co-simulación

En sistema implementado consta de 7 módulos que son: un transmisor, dos moduladores, una transmisión óptica, dos demoduladores y un receptor. Los bloques con el logotipo de Matlab son los que se implementaron en esta herramienta, los bloques en azul y amarillo se implementaron en la herramienta de simulación block mode de Optsim. Los bloques en azul son bloques que implementan dispositivos ópticos o eléctricos tales como generadores de señales pseudoaleatorias, drivers, moduladores, amplificadores entre otros, los bloques en amarillo son representas equipos de medición tales como analizadores de espectro, analizadores de modos, analizador de constelaciones y osciloscopios.

3.1 DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE DE CO-SIMULACIÓN IMPLEMENTADO

El software de co-simulación fue implementado mediante el uso de scripts y funciones en Matlab, para cada una de los módulos del sistema de transmisión. Para el módulo transmisor, se usaron dos bloques de co-simulación: el modulador digital y el codificador STBC. El primero, permite realizar la modulación de los datos binarios a símbolos BPSK, QPSK y 16QAM; mediante el uso del script de Matlab llamado `modemdigitalFMF.m`, el cual, llama a la función `modemdigital (data,Tm,M)`, en la cual sus parámetros son: los datos binarios, tipo de modulación y orden de la modulación respectivamente, la cual devuelve los símbolos modulados. En la Figura 3.2 se muestra el diagrama de flujo del modulador digital (a) y su función (b). El segundo, permite realizar la codificación de Alamouti de los símbolos modulados digitalmente; mediante el uso del script de Matlab `AlamoutiFMF.m`, el cual llama a la función `Alamouti (sym_rx,'1')`, en la cual sus parámetros son: los símbolos a codificar y bandera de existencia de matriz respectivamente, la cual devuelve los símbolos codificados para cada una de las ramas que alimentan a los moduladores OFDM/FOFDM. En la Figura 3.3 se muestra el diagrama de flujo del codificador de Alamouti (a) y su función (b).

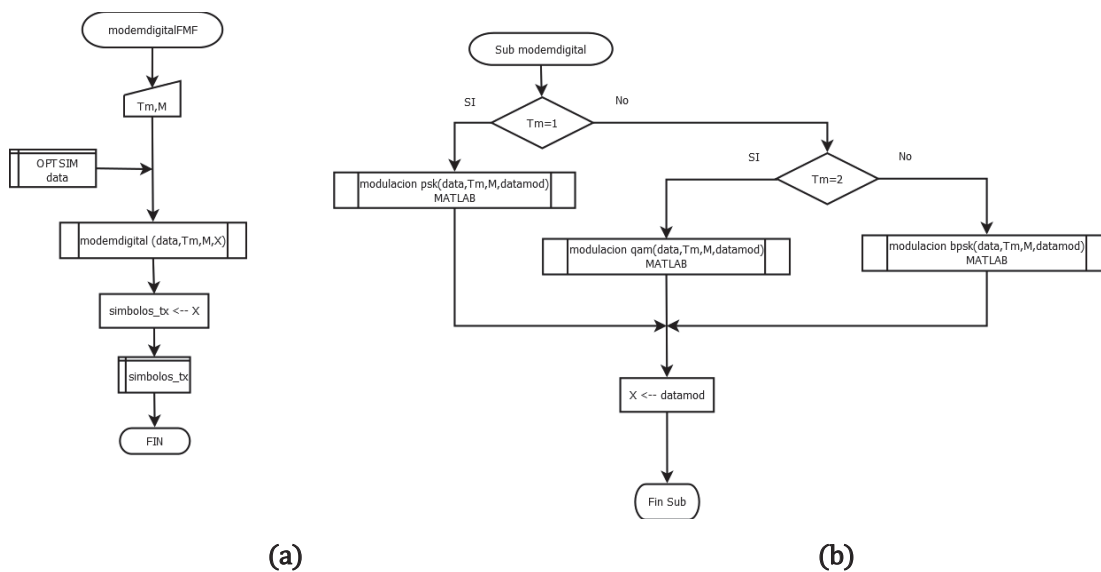


Figura 3. 2 Diagrama de flujo del modulador digital. (a) Modulador. (b) Función

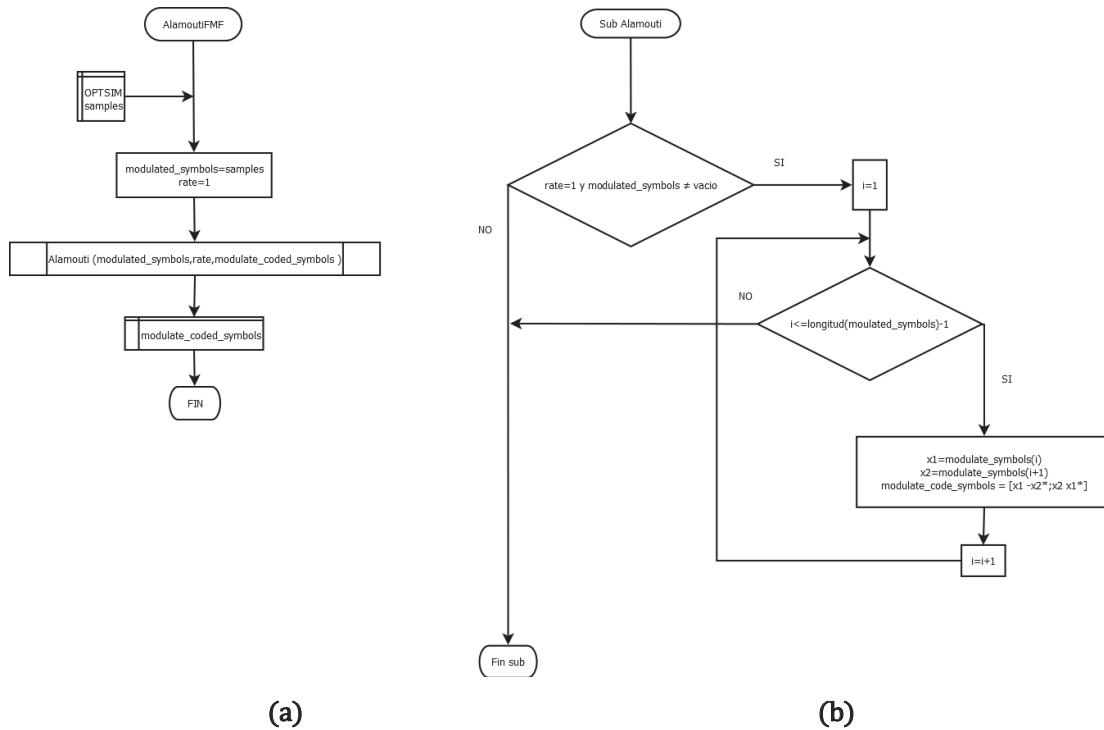


Figura 3.3 Diagrama de flujo de codificador Alamouti. (a) Codificador. (b) Función

Para el módulo modulador, se usaron dos bloques de co-simulación: modulador OFDM/FOFDM y el modulador en cuadratura. El primero permite realizar la modulación OFDM o FOFDM de los símbolos codificados STBC; mediante el uso del script de Matlab `modemOFDMFMF.m`, el cual llama a la función `modemFMF(sym_tx2,nFFTSsize,nBit,nBitPerSymbol,CP,tipomod)`, en la cual sus parámetros son: símbolos STBC, tamaño de la iFFT o iDCT, número de bits, número de bits por símbolo, muestra del prefijo cíclico, OFDM=1 o FOFDM=2 respectivamente, la cual devuelve los símbolos OFDM o FOFDM, en la Figura 3.4 se presenta el diagrama de flujo del modulador OFDM y FOFDM (a) y su función (b). El segundo permite subir en frecuencia la señal multiportadora OFDM o FOFDM mediante el uso del script de Matlab `modcuadraturaFMF.m`, el cual llama a la función `modcuadratura(insignal, Fc, Fs)`, en la cual sus parámetros son: señal OFDM o FOFDM en banda base, frecuencia de portadora, frecuencia de muestreo respectivamente, la cual, devuelve la señal multiportadora en banda pasante. En la Figura 3.5 se presenta el diagrama de flujo del modulador en cuadratura (a) y su función (b)

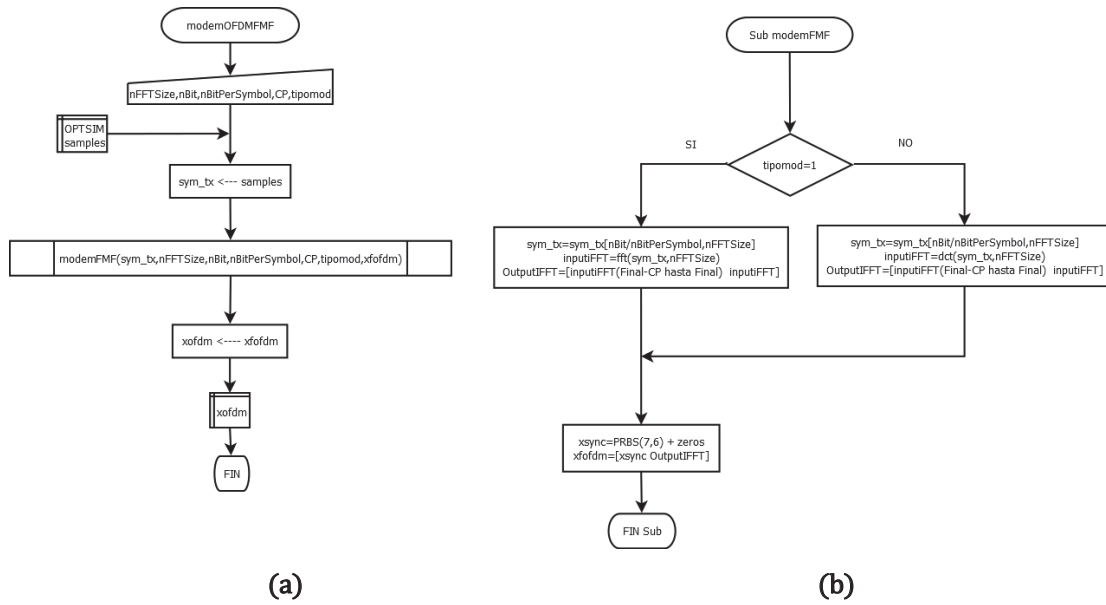


Figura 3. 4 Diagrama de flujo del modulador multiportadora. (a) Modulador. (b) Función.

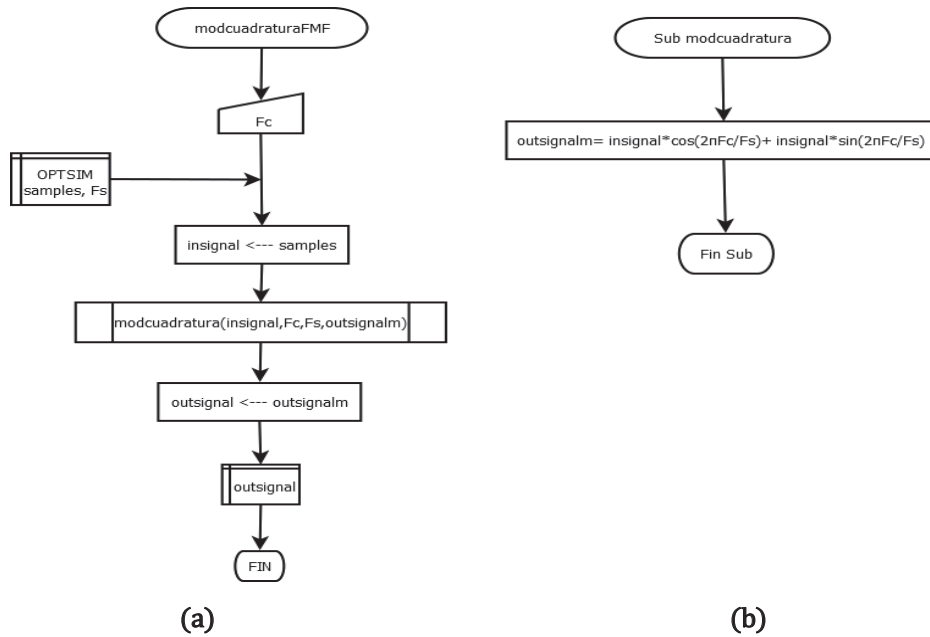


Figura 3. 5 Diagrama de flujo del modulador en cuadratura. (a) Modulador. (b) Función

Para el módulo transmisión óptica, se usa el bloque de co-simulación Fibra FMF, el cual, permite realizar la simulación de la fibra óptica de dos modos, mediante el uso del script de Matlab FibraFMF.m, el cual llama a la función CNLSE2m

($at_1, at_2, dt, dz, nz, \alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2, \gamma$), en la cual sus parámetros son: envolvente óptica modo 1, envolvente óptica modo 2, paso de tiempo, paso de distancia en la fibra óptica, atenuación modo1, atenuación modo2, retardo de modo diferencial modo 1, retardo de grupo del modo diferencial 2 respectivamente, la cual, devuelve la envolvente óptica para los dos modos. En la Figura 3.6 se indican los diagramas de flujo de la fibra óptica de pocos modos (a) y la función que genera los pulsos gaussianos a ser transmitidos (b), también se aprecia la función de estimación del canal la cual será implementada mediante el algoritmo de mínimos cuadrados (*LSE, Least Square Estimation*) y hace uso de la secuencia de entrenamiento incorporada en las señales multiportadora OFDM y FOFDM. En la Figura 3.7 se presenta el diagrama de flujo de la función CNLSE2m que permite resolver la ecuación acoplada no lineal de Schrödinger.

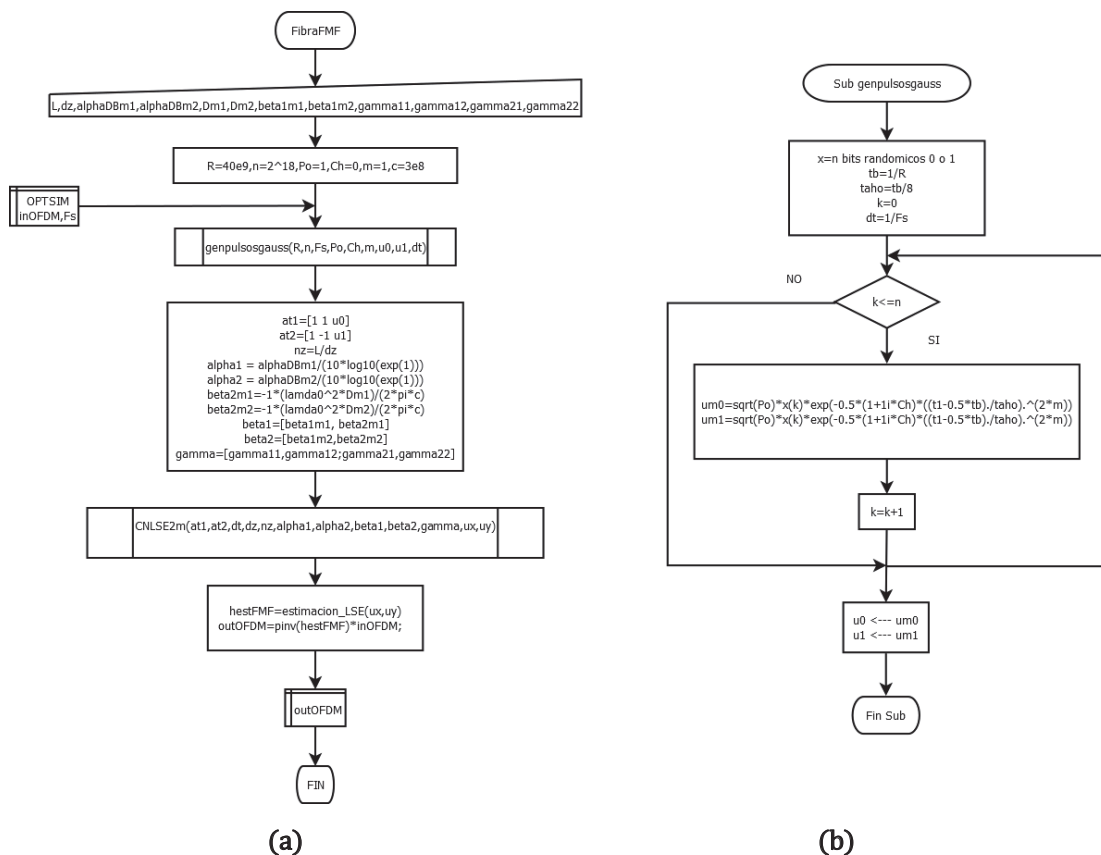


Figura 3. 6 Diagrama de flujo para FMF. (a) Canal . (b) Generación de pulsos gaussianos.

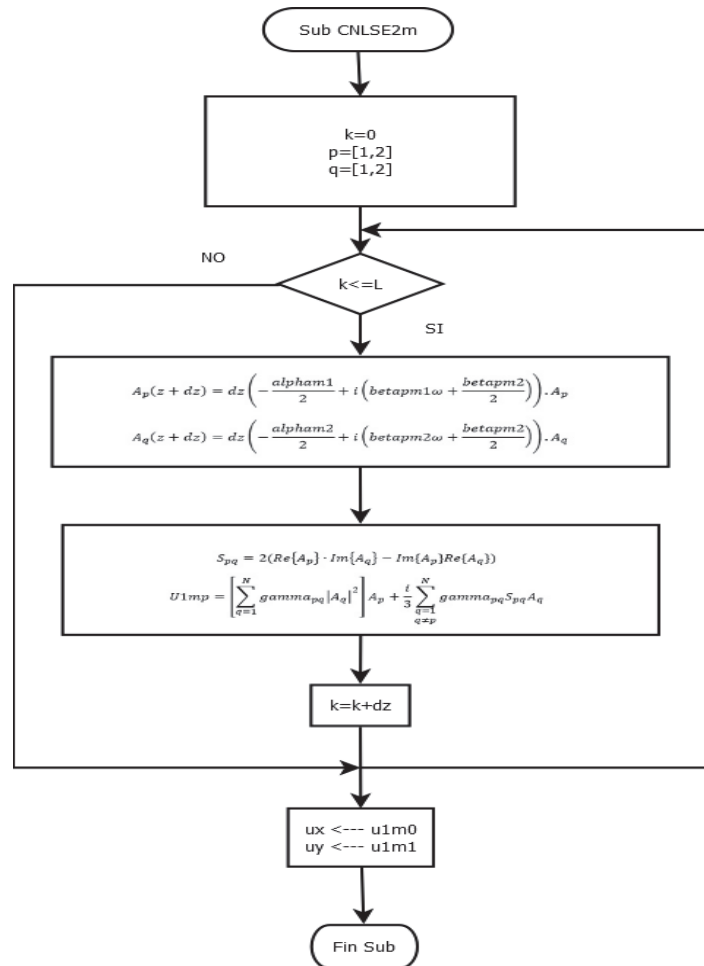


Figura 3. 7 Diagrama de flujo para la solución de la CNLSE de la fibra óptica de pocos modos

Para el módulo demodulador, se usaron dos bloques de co-simulación: demodulador cuadratura y demodulador OFDM FOFDM. El primero permite bajar en frecuencia la señal OFDM o FOFDM a banda base; mediante el uso del script de Matlab demodcuadraturaFMF.m, el cual llama a la función demodcuadratura (insignal, Fc, Fs), en la cual sus parámetros son: señal OFDM o FOFDM, frecuencia de portadora, frecuencia de muestreo respectivamente, la cual devuelve la señal OFDM o FOFDM en banda base, en la Figura 3.8 se muestra el diagrama de flujo del demodulador en cuadratura (a) y su función (b). Además, en este demodulador se procederá a separar la parte real de la parte imaginaria de los símbolos BPSK, QPSK y 16QAM generados con el fin de realizar un tratamiento digital adecuado para la ecualización posterior de los mismos.

El segundo, permite demodular la señal OFDM o FOFDM para obtener los símbolos STBC; mediante el uso del script de Matlab demodOFDM.m, el cual llama a la función demodemFMF (yfofdm,CPrx,Nfft,Nsym,Nbitssym,tipomod2), en la cual sus parámetros son: señal OFDM o FOFDM recibida en banda base, muestras del prefijo cíclico, tamaño de la FFT o DCT, número de símbolos, número de bits por símbolo, OFDM=1 o FOFDM=2 respectivamente, la cual, devuelve los símbolos STBC enviados. En la Figura 3.9 se muestra el diagrama de flujo del demodulador multiportadora (a) y su función (b), este demodulador también permitirá realizar la sincronización de los símbolos OFDM y FOFDM mediante el uso de los símbolos de entrenamiento enviados al inicio de la transmisión.

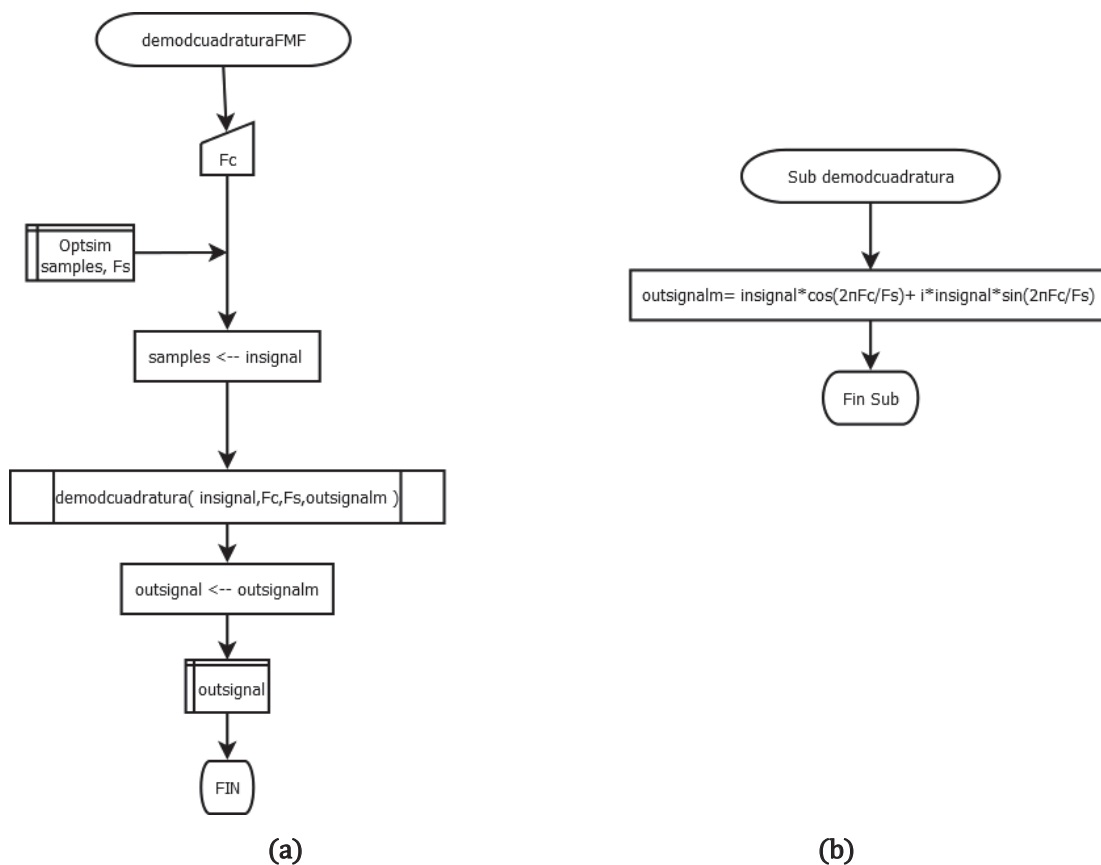


Figura 3. 8 Diagrama de flujo del demodulador en cuadratura. (a) demodulador. (b) Función

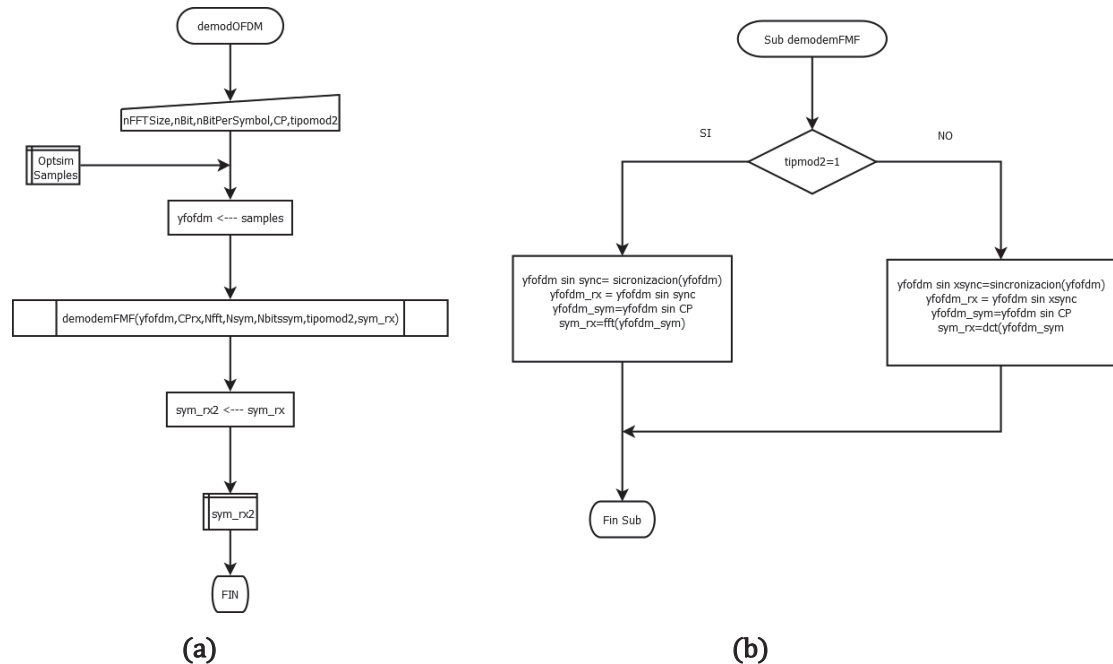


Figura 3. 9 Diagrama de flujo de demodulador multiportadora. (a) Demodulador. (b) Función

Para el módulo receptor, se usaron tres bloques de co-simulación: decodificador STBC, demodulador digital y BERT. El primero, permite decodificar los símbolos transmitidos, que se codificaron usando el código espacio temporal de Alamouti; mediante el uso del script de Matlab `decoderstbcFMF.m`, el cual implementa un receptor zero forcing y un ecualizador, devolviendo así los símbolos digitales transmitidos, tanto el receptor zero forcing como el ecualizador usarán el canal estimado de la fibra óptica de pocos modos, la Figura 3.10 muestra el diagrama de flujo del decodificador STBC. El segundo permite decodificar los símbolos digitales BPSK, QPSK y 16QAM que se transmitieron; mediante el uso del script de Matlab `demdigitalFMF.m`, el cual llama a la función `demdigital(Yr,Tm,M)`, en la cual, sus parámetros son: señal modulada digitalmente, tipo de modulación, orden de la modulación respectivamente, la cual devuelve los bits que se estimaron fueron transmitidos, en la Figura 3.11 se indica el diagrama de flujo del demodulador digital (a) y su función (b). El tercero, permite calcular los parámetros de desempeño BER, Q^2 y EVM del sistema de comunicaciones óptico; mediante el uso del script de Matlab `BERT.m`, el cual guarda las mediciones en un archivo `.txt`, para un posterior

análisis y representación de los resultados obtenidos, la Figura 3.12 se muestra el diagrama de flujo del contador de errores.

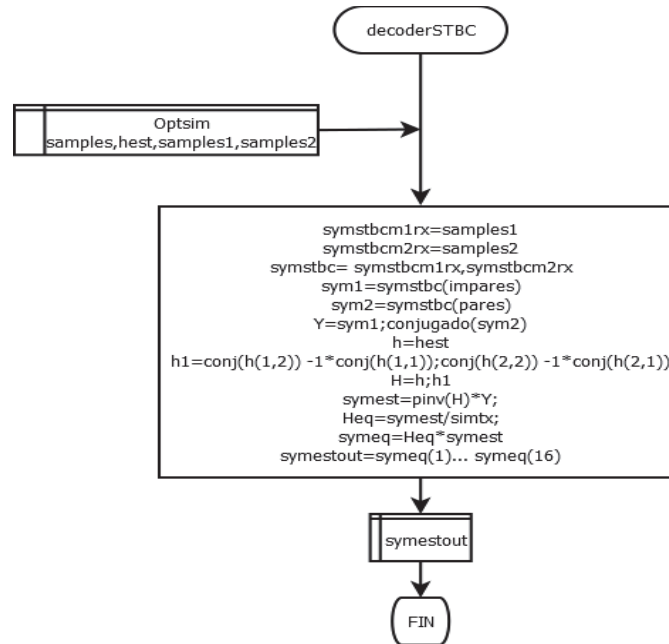


Figura 3. 10 Diagrama de flujo del decodificador STBC

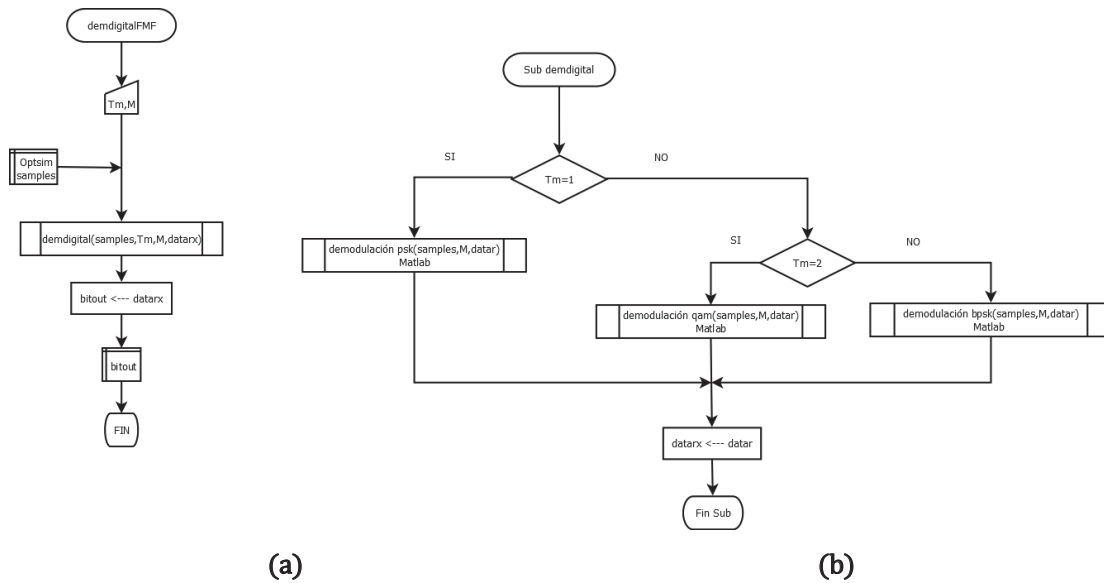


Figura 3. 11 Diagrama de flujo del demodulador digital. (a) Demodulador. (b) Función

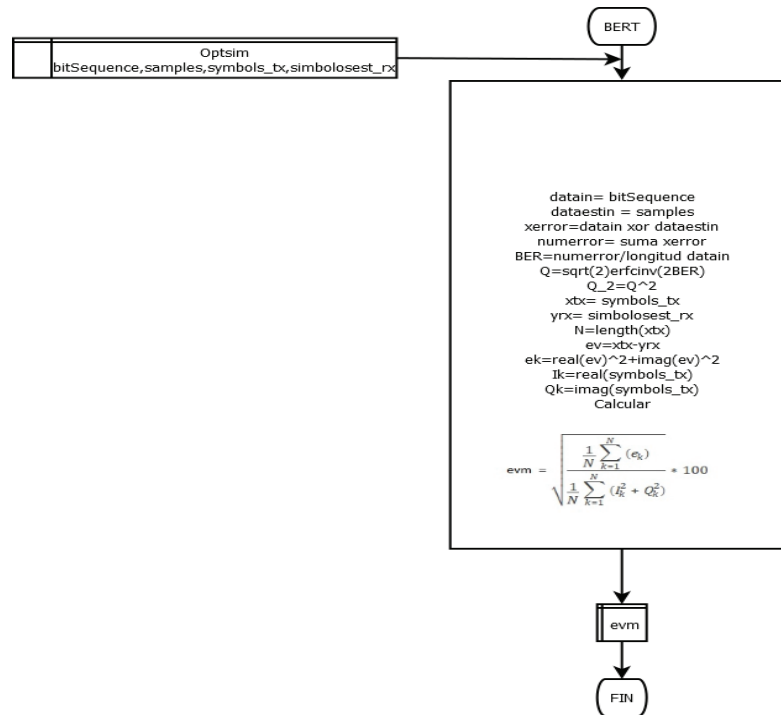


Figura 3. 12 Diagrama de flujo del contador de errores BER, EVM y Q²

3.2 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE SIMULACIÓN IMPLEMENTADO

El transmisor se implementó mediante un generador pseudoaleatorio de secuencias binarias (PRBS), el mismo que genera $2^{18}-1$ datos binarios a transmitir, el cual alimenta a un modulador de señales digitales que mapea estos bits a símbolos BPSK, QPSK y 16QAM. Estos símbolos son codificados mediante un codificador STBC que implementa la codificación de Alamouti 2X2 con el objetivo de separar los datos que se mezclan como producto del acoplamiento del canal de la fibra FMF. Entonces, estos datos codificados se inyectan a dos bloques moduladores OFDM y FODM, los cuales implementa la modulación OFDM y FOFDM mediante el uso de 128 subportadoras de datos y 10 muestras de prefijo cíclico, los cuales fueron elegidos para mantener bajo los niveles del PAPR y para compensar la dispersión cromática respectivamente [11], [51]. Este bloque también genera dos símbolos OFDM y FODFM de entrenamiento para sincronización y estimación del canal T_{11} y T_{22} , generados mediante una PRBS $2^7 - 1$, como en [53], [65], así tenemos:

$$\begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} \\ y_{21} & y_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{11} & 0 \\ 0 & T_{22} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_{11} & n_{12} \\ n_{21} & n_{22} \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Donde, el primer subíndice se refiere al modo por el cual se enviará y el segundo subíndice representa el tiempo en el que se enviará. Por lo tanto, si despreciamos el ruido tendremos:

$$\begin{bmatrix} \text{hest}_{11} & \text{hest}_{12} \\ \text{hest}_{21} & \text{hest}_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{y_{11}}{T_{11}} & \frac{y_{12}}{T_{22}} \\ \frac{y_{21}}{T_{11}} & \frac{y_{22}}{T_{22}} \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Donde, *hest* es el canal estimado.

La secuencia de entrenamiento T_{11} y T_{22} están desplazadas en tiempo para cada uno de los dos modos de propagación cómo observa en la Figura 3.13 para una señal OFDM.

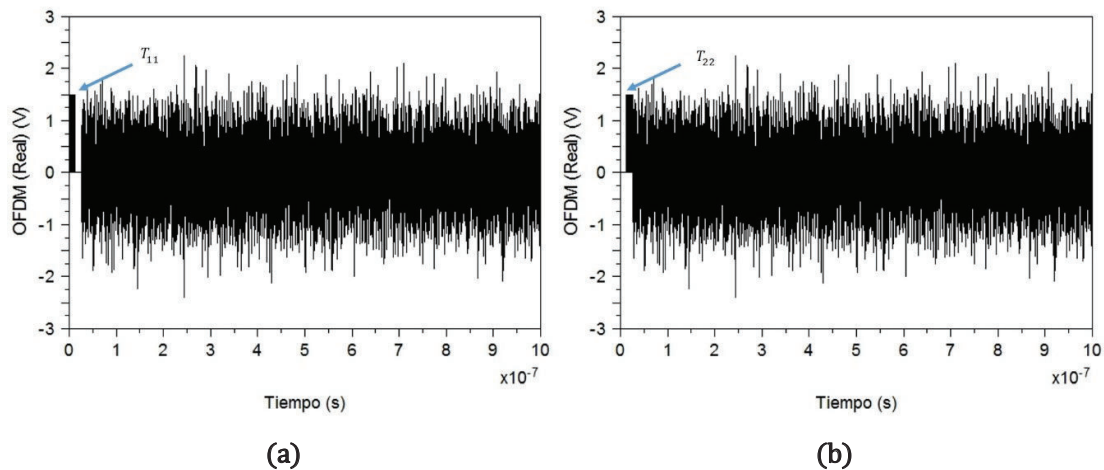


Figura 3.13 Señal OFDM con secuencias de entrenamiento para sincronización y ecualización. (a) Para el modo 1. (b) Para el modo2.

Fueron enviados 128 símbolos OFDM y FOFDM incluidos las secuencias de entrenamiento, conteniendo 128 símbolos BPSK, QPSK y 16QAM a una velocidad de 40Gb/s, para emular las futuras redes de acceso ópticas. Estos símbolos fueron subidos en frecuencia a 60GHz, para simular el trabajo en la nueva banda para sistemas de radio sobre fibra mediante un modulador en cuadratura [66], para evitar las frecuencias de intermodulación y transmitirlos mediante un solo modulador Mach Zehnder, como se observa en la figura 3.14, (a) banda base, (b) banda pasante.

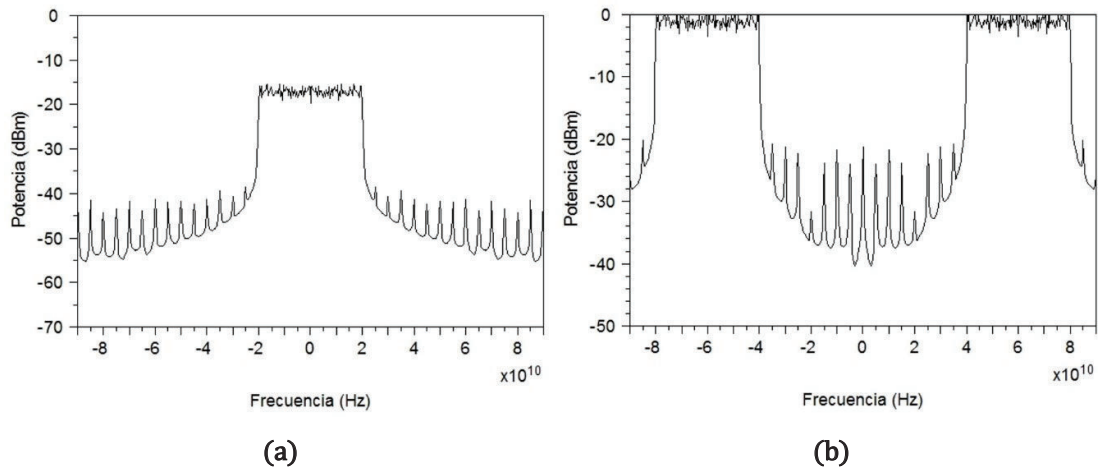


Figura 3- 14 Espectro de la señal FOFDM. (a) Banda base. (b) Banda pasante

Las señales OFDM y FOFDM fueron moduladas en intensidad mediante dos moduladores Mach Zender los cuales trabajaron en su punto de cuadratura, alimentados por dos láseres de onda continua que simulan a dos láseres de cavidad externa (External Cavity Laser, ECL) a 1550nm, estos laser fueron configurados para trabajar en los modos LP01 y LP11, los dos haces fueron introducidos en la fibra óptica mediante un multiplexor de modo, el cual fue implementado en Matlab, en este se consideró una multiplexación ideal; aunque, se incluyeron pérdidas y ruido en el mismo ya que un modelo real está fuera de los objetivos de este trabajo. La Figura 3.15 muestra el espectro óptico de la señal FOFDM y el campo modal respectivo.

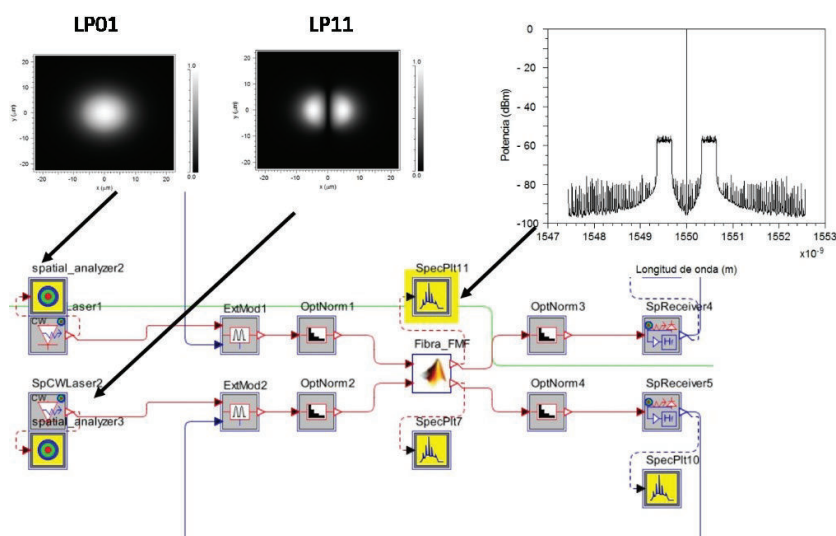


Figura 3. 15 Campo modal y espectro óptico para sistema multiportadora FOFDM

Las señales así multiplexadas de manera modal, fueron introducidas por un canal de fibra FMF modelada en Matlab como una fibra TMF, mediante el modelo CNLSE indicado con anterioridad, cuyo parámetros base se consideraron como en [53]. Sin embargo, para el parámetro DMGD se consideraron fibras experimentales diseñadas con valores bajos de DMGD, cuyos valores varían de 0 ps/Km hasta 6 ps/km [57][26], se eligió un valor un poco menor a la mitad tomando en consideración que esta se posible fabricarla ya que valores más bajos son difíciles de obtener por errores en el proceso de fabricación, la Tabla 3.1 resume los parámetros escogidos para las simulaciones.

Tabla 3.1 Parámetros de simulación para FMF

Parámetros	Atenuación [dB/km]	Dispersión cromática LP01/LP11 [ps/nm/km]	DMGD [ps/km]	Área efectiva LP01/LP11 [μm^2]
Valores	0.25	22/17	2.7	92.3/148.4

El canal de la fibra TMF fue estimado mediante el algoritmo LS (Least Square Estimation), para lo cual se usó secuencias ortogonales especiales como en [67], en la cual se plantea el uso de una sub-matriz de la transformada discreta de Fourier, así se tiene [67]:

$$Ys = HXp + W \quad (3.3)$$

Donde $Xp = [x1, x2, \dots, xn]$ es la secuencia de entrenamiento, $Ys = [y1, y2, \dots, yn]$ es la secuencia recibida y H es la matriz del canal, si despreciamos el ruido W entonces, el canal de fibra óptica $Hest$ se puede estimar como [67]:

$$Hest = YsXp^\dagger \quad (3.4)$$

En la cual $Xp^\dagger = Xp^H(XpXp^H)^{-1}$ es la pseudoinversa de Xp , y es igual a [67]:

$$Xp = \sqrt{\frac{\rho}{nt}} \begin{bmatrix} 1 & \cdots & 1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & \cdots & e^{j2\pi/n(t-1)(n-1)} \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

En donde t es el número de antenas transmisoras y n es el número de antenas receptoras en nuestro caso 2 ya que tenemos dos modos.

La matriz así estimada se usa para modelar la propagación del canal ya que el canal de fibra óptica FMF permanece estable por periodos largos que exceden las dos horas [68], entonces si las comparamos con el tiempo de los símbolos OFDM y FOFDM se puede asumir como un canal invariante en el tiempo.

Las señales ópticas al final de la fibra FMF, fueron separadas mediante un demultiplexor modal implementado en Matlab, asumiéndolo ideal pero incluyendo atenuación y ruido al mismo, las señales eléctricas son recuperada mediante dos fotodetectores PIN con una responsividad de 0.8 A/W, entonces es bajada a banda base mediante los demoduladores en cuadratura y los símbolos son recuperados mediante los demoduladores OFDM y FOFDM implementados en Matlab.

Los símbolos recuperados ingresan a decodificador STBC en el que se implementó el algoritmo de Zero Forcing y el cual hace uso de la matriz del canal FMF, matemáticamente se puede expresar como[69] :

$$y = hx + w \quad (3.6)$$

En la cual se tiene [69]:

$$h = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \\ h_{12}^* & -h_{11}^* \\ h_{22}^* & -h_{21}^* \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

$$y = \begin{bmatrix} y_{11} \\ y_{21} \\ y_{12}^* \\ y_{22}^* \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

Donde h es la matriz estimada del canal de FMF, y_{11}, y_{21} son los símbolos recibidos en el tiempo 1 por los modos 1 y 2 respectivamente, y_{12}, y_{22} son los símbolos

recibidos en el tiempo 2. Entonces, si despreciamos el ruido w , los símbolos estimados \tilde{x} que se transmitieron serán [69]:

$$\tilde{x} = h^\dagger y \quad (3.9)$$

En la cual h^\dagger es la pseudoinversa de la matriz h , estos símbolos estimados son luego ecualizados en este mismo bloque, de manera que los símbolos son corregidos en fase y amplitud. Estos símbolos ecualizados son enviados al demodulador digital que recupera los bits que se estiman fueron transmitidos, los cuales son comparados con los enviados en el bloque BERT que permite calcular el factor de desempeño Q^2 , basados en el parámetro EVM usado para evaluar el desempeño en sistemas de radio frecuencia y sistemas de radio sobre fibra óptica; estos últimos bloques fueron también implementados en Matlab.

3.3 SIMULACIONES COMPARATIVAS DE OFDM-MIMO Y FOFDM-MIMO

En primer lugar, la comparación de los sistemas OFDM-MIMO y FOFDM-MIMO se realizó para símbolos BPSK, se transmitieron 128 símbolos OFDM y FOFDM, con un ancho de banda aproximado de 40 GHz, a una velocidad de 40 Gb/s con una potencia de la señal de radio frecuencia de 0 dBm para ambas modulaciones. Cabe señalar, que debido a que se usa un solo modulador en intensidad por modo, fue necesario trabajar con un sistema de doble banda lateral para FOFDM (DSB-FOFDM), lo que hace que el ancho de banda sea el mismo y no de aproximadamente la mitad, debido a que la parte negativa del espectro de también debe ser transmitida para modulaciones complejas, esto se muestra en la Figura 3.16, (a) OFDM, (b) FOFDM, esto ayudará también a realizar una comparación más adecuada.

La longitud de onda fue configurada a 1550 nm y la potencia de los láseres por modo a 0 dBm, la longitud de la fibra óptica FMF fue de 20 km para simular una red de acceso y los parámetros configurados son los mostrados en la Tabla 3.1, las

señales fueron detectadas por dos fotodiodos PIN de 0.8 A/W de responsividad⁷; luego, las señales fueron bajadas a banda base, decodificadas y demoduladas.

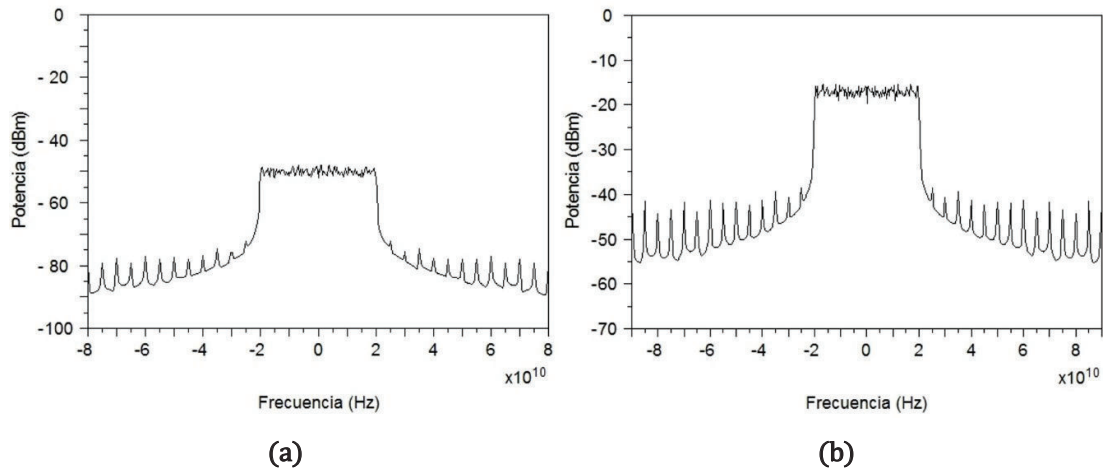


Figura 3. 16 Espectros para modulación BPSK. (a) OFDM. (b) DSB-FOFDM.

Finalmente, se evaluó el EVM, mientras se variaba la potencia de recepción de un modo, manteniendo el otro constante a -6 dBm, valor que permite estar por debajo de límite FEC y da un rango adecuado para las medidas, esto se realizó mediante un atenuador óptico variable para simular una división de potencia de los usuarios conectados a la red de acceso óptica, los resultados se muestran en la Figura 3.17, (a) OFDM, (b) FOFDM.

⁷ Es una medida de la eficiencia de la transformación de la potencia óptica en corriente eléctrica

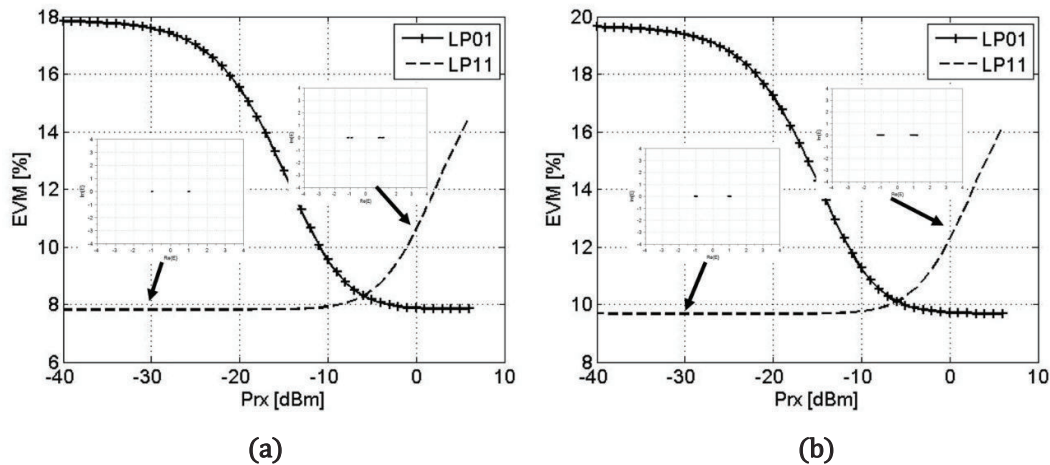


Figura 3. 17 Desempeño del sistema óptico con fibra óptica de pocos modos para sistemas multiportadora con modulación BPSK. (a) OFDM. (b). DSB-FOFDM

En ella se observa un comportamiento similar y contrario de los modos LP01 y LP11 en ambas modulaciones multiportadoras, es decir, que mientras la potencia de recepción del modo LP11 permanece constante (a -6 dBm) y se reduce la potencia de recepción del modo LP01, el EVM empeora degradando el sistema de transmisión óptica y al contrario, si la potencia del modo LP01 se incrementa el EVM mejora lo que se traduce en un mejor desempeño del sistema óptico, esto es observado en los diagramas de constelaciones de la Figura 3.17, para potencias de recepción de -30 dBm y 0 dBm respectivamente. Lo anterior puede explicarse por el acoplamiento modal que existe entre ellos, una mejora de aproximadamente 2% en el EVM de OFDM respecto a FOFDM se aprecia. El punto de equilibrio (cruce de las dos curvas) corresponde a una potencia de recepción de -6 dBm para ambas modulaciones multiportadoras, a la izquierda de este se observa un piso de BER que se debe al acoplamiento modal en conjunto con el bajo retardo de modo diferencial y el ruido introducido en el receptor; a la derecha se observa un crecimiento exponencial del EVM el que se explica por las no linealidades de la fibra simulada y la transferencia de potencia de un modo a otro.

Luego, se procedió a simular los sistemas multiportadoras con símbolos QPSK, a una velocidad de 40 Gbps, bajo los mismos parámetros de la simulación anterior, la Figura 3.18, (a) OFDM, (b) FOFDM, muestra los espectros de OFDM y FOFDM respectivamente, cuyos ancho de banda son de aproximadamente 20 GHz que corresponden a lo teóricamente esperado [5].

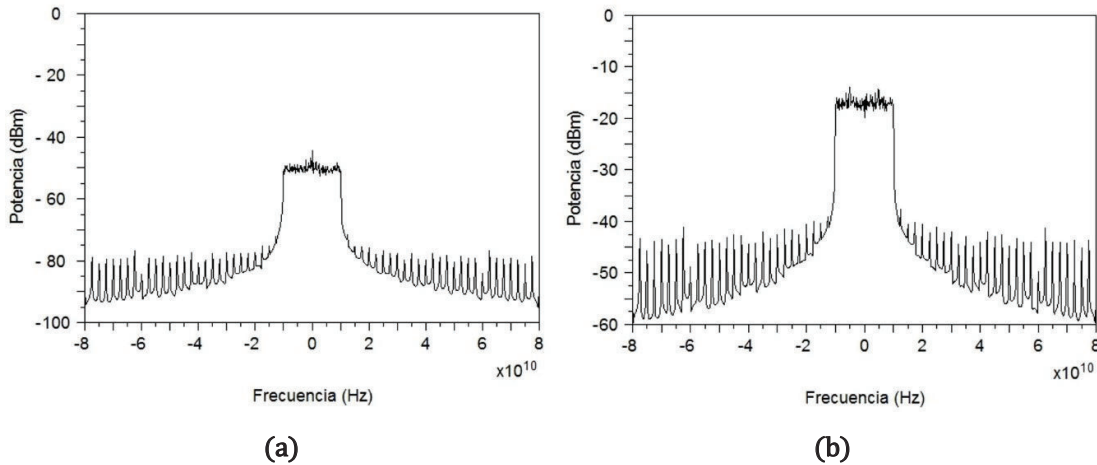


Figura 3. 18 Espectros para modulación QPSK. (a) OFDM. (b) DSB-FOFDM.

En la Figura 3.19, (a) OFDM, (b) FOFDM, se indican los resultados de la caracterización de las modulaciones multiportadoras respecto a la potencia recibida y al EVM.

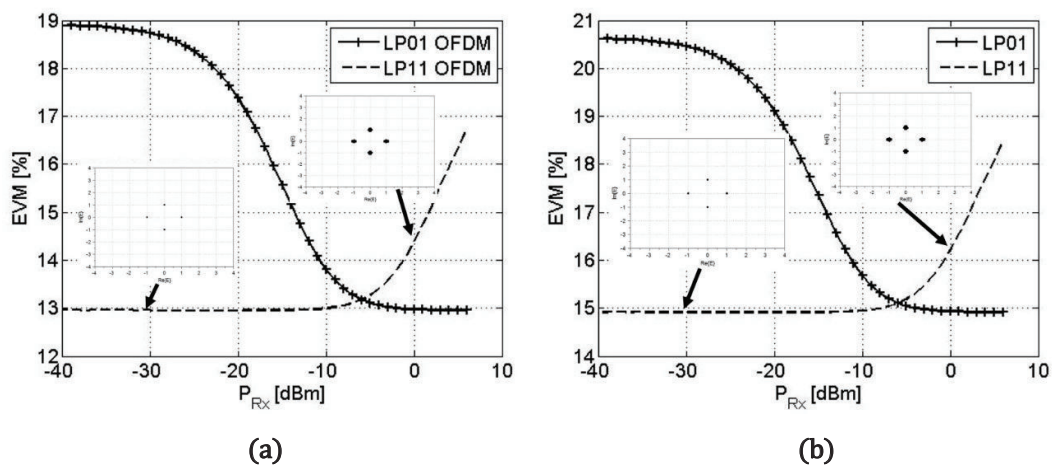


Figura 3. 19 Desempeño del sistema óptico con fibra óptica de pocos modos para sistemas multiportadora con modulación QPSK. (a) OFDM. (b) DSB-FOFDM

Al igual que en el caso anterior, se tiene un comportamiento similar para las dos modulaciones multiportadoras y un 2% de mejora en el EVM de OFDM con respecto a FOFDM es alcanzado. Sin embargo, se tiene una disminución en el desempeño

del sistema, respecto a la modulación BPSK, de 6% y 5% para OFDM y FOFDM respectivamente.

Finalmente, se procedió a simular los sistemas OFDM-MIMO y FOFDM-MIMO con símbolos 16QAM, a una velocidad de 40 Gbps, bajo los mismos parámetros de la simulación anterior, la Figura 3.20, muestra los espectros de OFDM y FOFDM respectivamente, de similar forma se aprecia que el ancho de banda es de 10 GHz aproximadamente, concordando con lo esperado teóricamente.

En la Figura 3.21 se indican los resultados de la caracterización de las modulaciones multiportadoras respecto a la potencia recibida y al EVM, en ella se observa una mejora de 2% en el EVM de OFDM con respecto a FOFDM. Contrario a lo esperado, una mejora en el EVM de 2% con respecto a BPSK y de 7% con respecto a QPSK para ambas modulaciones multiportadoras es obtenida.

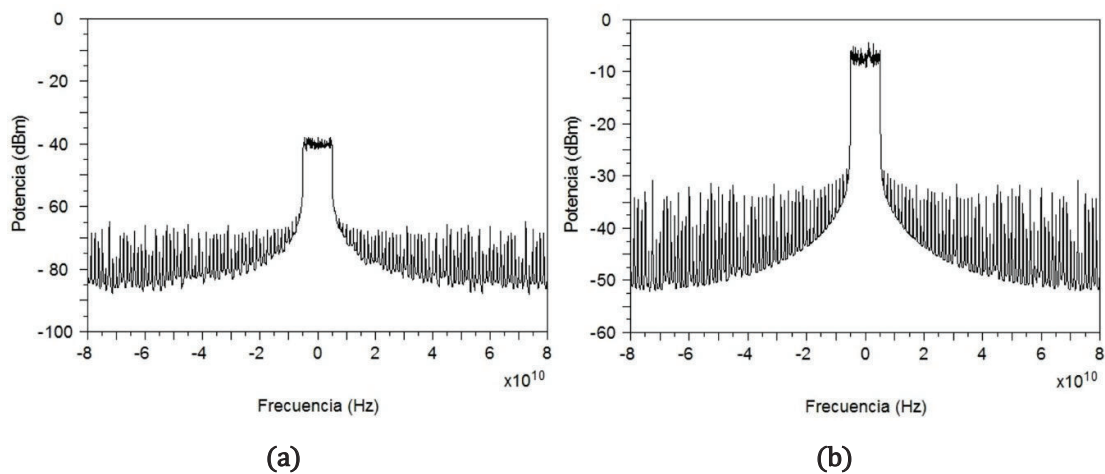


Figura 3. 20 Espectros para modulación 16QAM. (a) OFDM. (b) DSB-FOFDM.

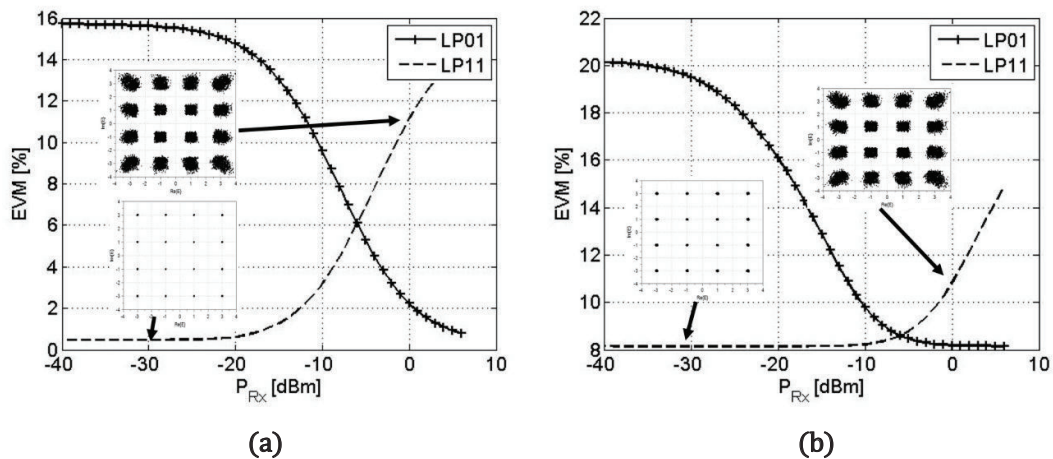


Figura 3- 21 Desempeño del sistema óptico con fibra óptica de pocos modos para sistemas multiportadora con modulación 16QAM. (a) OFDM. (b). DSB-FOFDM

El comportamiento de los dos sistemas anteriores es similar al primero y puede explicarse por el acoplamiento modal, el bajo retardo de modo diferencial y el ruido en el receptor. Sin embargo, la mejora de EVM de 16 QAM respecto a BPSK y QPSK, se debe a que esta es más sensible al ruido y por lo tanto, el algoritmo de codificación y decodificación STBC es más eficiente, lo que permite recuperar de mejor manera los símbolos transmitidos.

CAPÍTULO 4

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para evaluar el desempeño de los sistemas multiportadoras OFDM y FOFDM se realizaron simulaciones respecto a la variación de la potencia de entrada de radio frecuencia y el factor de calidad Q^2 , el mismo que se define como [70]:

$$Q_{[dB]}^2 = -20 \log_{10}(2 \cdot EVM) \quad (4.1)$$

La evaluación de la potencia de entrada de radio frecuencia (P_{in}) se realizó tomando en consideración la potencia de las señales originales generadas en Matlab, las cuales fueron de -55 dBm y -22 dBm para OFDM y FOFDM respectivamente. Con el fin de realizar una evaluación adecuada, se tomó como potencia de referencia la menor, y con base en esta se realizaron variaciones en un rango de 12 dBm para cada una de las modulaciones multiportadoras y para cada una de las modulaciones digitales. Se tomaron como referencia para el factor Q^2 los valores de 0.68, 4.08 y 11.47 que corresponde a un BER de $1 \cdot 10^{-3}$ (Límite FEC) para las modulaciones BPSK, QPSK y 16QAM respectivamente [71].

4.1 COMPARACIÓN DE LA POTENCIA DE ENTRADA

La comparación de potencia de entrada para los sistemas OFDM-MIMO y FOFDM-MIMO se realizó para símbolos BPSK, se transmitieron 128 símbolos OFDM y FOFDM, con un ancho de banda aproximado de 40 GHz, a una velocidad de 40 Gb/s, la longitud de onda fue configurada a 1550 nm, la potencia óptica de los láseres por modo a 0 dBm, la longitud de la fibra óptica FMF fue de 20 km para simular una red de acceso y sus parámetros usados fueron los de la tabla 3.1, las señales fueron detectadas por dos fotodiodos PIN de 0.8 A/W de responsividad.

La Figura 4.1 muestra la comparación de la potencia de entrada versus el factor de calidad Q^2 para BPSK.

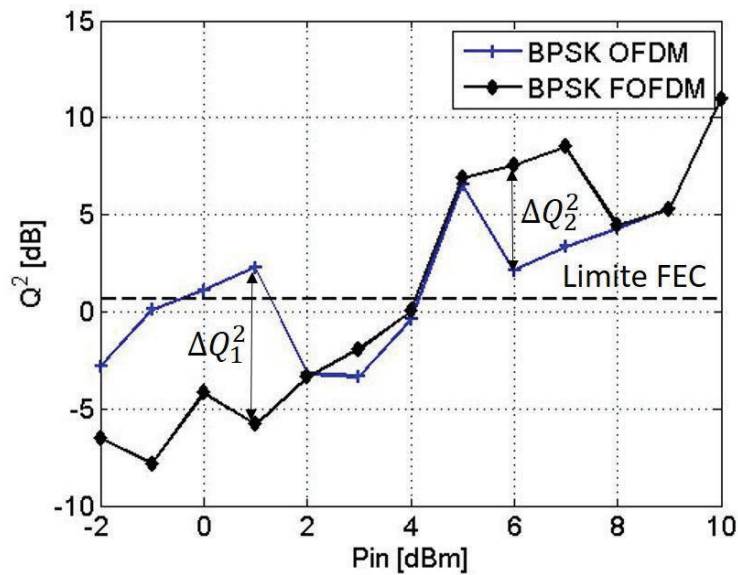


Figura 4. 1 Comparación de la potencia de entrada de los sistemas OFDM y DSB-FOFDM con modulación BPSK para 20 km de fibra óptica de pocos modos

Se puede observar en la figura que ambas tienen el mismo valor de 4.1 para un FEC de $1 \cdot 10^{-3}$, sobre este se tiene un comportamiento similar a partir de 8 dBm. Sin embargo, por debajo del límite FEC, se observa que OFDM tiene mejor desempeño y una mejora de aproximadamente 7 dB (ΔQ_1^2) para una potencia de entrada de 1 dBm, esto implica que es más robusto al ruido óptico que FOFDM; por encima del límite FEC, FOFDM tiene un mejor desempeño en casi 6 dB (ΔQ_2^2) para una potencia de entrada de 6 dBm, esto implica que en este rango FOFDM es más robusto frente a las no linealidades de la fibra óptica FMF.

Para el caso de QPSK, se usaron los mismos parámetros de simulación de BPSK, es decir, se transmitieron 128 símbolos OFDM y FOFDM, con un ancho de banda aproximado de 20 GHz, a una velocidad de 40 Gb/s, la longitud de onda fue configurada a 1550 nm, la potencia óptica de los láseres por modo a 0 dBm, la longitud de la fibra óptica FMF fue de 20 km para simular una red de acceso y sus parámetros usados fueron los de la tabla 3.1, las señales fueron detectadas por dos fotodiodos PIN de 0.8 A/W de responsividad. En la Figura 4.2 se presenta la comparación respecto a la modulación QPSK para ambas modulaciones multiportadoras.

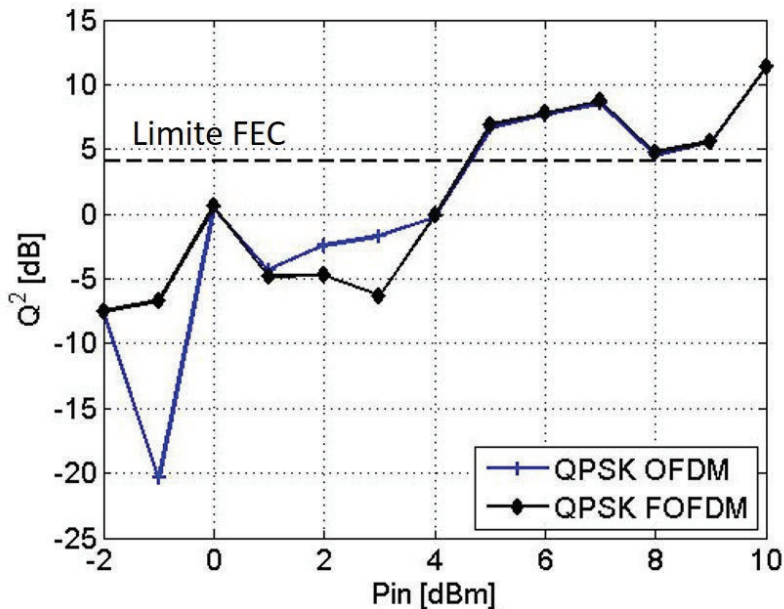


Figura 4. 2 Comparación de la potencia de entrada de los sistemas OFDM y DSB-FOFDM con modulación QPSK para 20 km de fibra óptica de pocos modos

Es apreciable en la figura el comportamiento igual de las dos señales multiportadoras sobre el límite FEC, al cual se llega a una potencia de entrada de 4.7 dBm para ambas modulaciones, a diferencia del caso anterior un comportamiento contrario se observa debajo del límite FEC, entre 0 y -2 dBm FOFDM es más robusta al ruido que OFDM y al contrario entre -2 y 4.7 dBm, debido a que QPSK es más sensible al ruido óptico que BPSK y debajo del límite FEC la media del EVM es más crítica y sensible.

Para el caso de 16QAM, se implementó la simulación usando los mismo parámetros que los dos escenarios anteriores, así tenemos, que se transmitieron 128 símbolos OFDM y FOFDM, con un ancho de banda aproximado de 10 GHz, a una velocidad de 40 Gb/s, la longitud de onda fue configurada a 1550 nm, la potencia óptica de los láseres por modo a 0 dBm, la longitud de la fibra óptica FMF fue de 20 km para simular una red de acceso y sus parámetros usados fueron los de la Tabla 3.1, las señales fueron detectadas por dos fotodiodos PIN de 0.8 A/W de responsividad. En la Figura 4.3 se comparan las modulaciones multiportadoras para la modulación digital 16QAM, es evidente el comportamiento similar de OFDM y FODM por

encima del límite FEC, por debajo del límite FEC, se observa un comportamiento similar de las dos señales multiportadoras corroborando los resultados anteriores respecto a una mejora en el EVM si se la compara con BPSK y QPSK como consecuencia del mejor desempeño de los sistemas que se obtiene en ordenes de modulación alto cuando se usa un codificador y decodificador STBC.

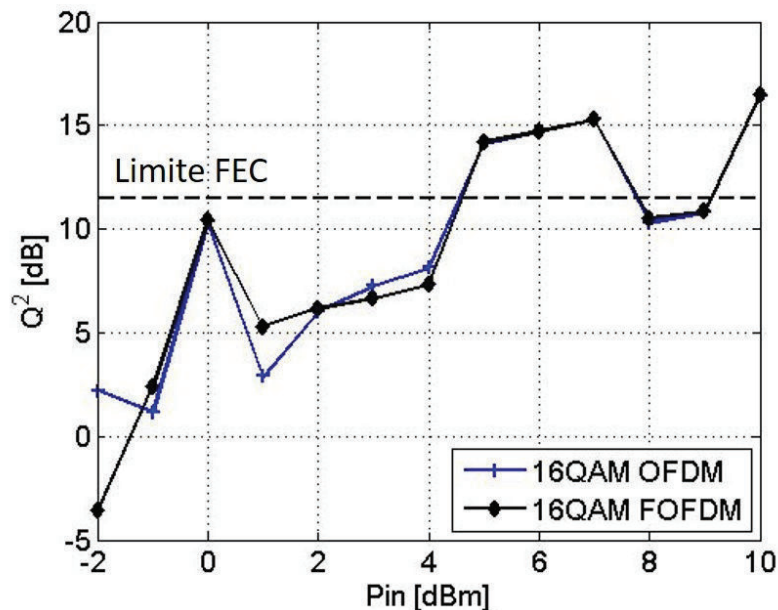


Figura 4. 3 Comparación de la potencia de entrada de los sistemas OFDM y DSB-FOFDM con modulación 16QAM para 20 km de fibra óptica de pocos modos

En todos los casos se observa un comportamiento un poco errático, pero con tendencia a incrementar el desempeño del sistema cuando la potencia de entrada se incrementa y viceversa, este comportamiento se debe al hecho de que las señales está siendo acopladas al ingresar y propagarse por la fibra óptica FMF y como el retardo de modo diferencial es pequeño los modos se ven mutuamente como ruido, aun cuando el codificador STBC los codifica de manera ortogonal.

Para el caso de 16QAM se aprecia una disminución en el desempeño del sistema por debajo del límite FEC, cuando la potencia de entrada esta entre 8 y 9 dBm, esto se debe, al efecto conjunto de las no linealidades y la variación en fase que tiene la señal óptica debido al acoplamiento modal de la fibra pocos modos, por ello se observa que nuevamente tiende a incrementar el desempeño del sistema. Este

efecto no se aprecia en las otras modulaciones, debido a que estas son más robustas al cambio de fase de la señal que la modulación 16QAM.

4.2 COMPARACIÓN DE LA VARIACIÓN DEL DMGD

La comparación de los sistemas multiportadora OFDM y FOFDM con respecto a la variación del DMGD y el desempeño del sistema óptico dado por Q^2 , se realizó tomando en consideración un variación de 0 ps/km hasta 5 ps/Km, debido a que después de la revisión del estado del arte, se ha encontrado que se han conseguido fibras ópticas de pocos modos con DMGD menores a 6 ps/Km [72][57][26]. La potencia de entrada de radio frecuencia para OFDM y FOFDM fue fijada a aquella que permite obtener un BER de $1 \cdot 10^{-3}$ (Límite FEC) para cada una de las modulaciones digitales, las cuales fueron encontradas en las comparaciones de la potencia de entrada.

En primer lugar se realizó la simulación de OFDM y FOFDM para la modulación digital BPSK, manteniendo fija la potencia de entrada óptica a 0 dBm y la potencia de entrada de radio frecuencia para ambas a 4.1 dBm, la Figura 4.4 muestra el resultado de la comparación y el limite FEC que corresponde a un factor Q^2 de 0.68 dB.

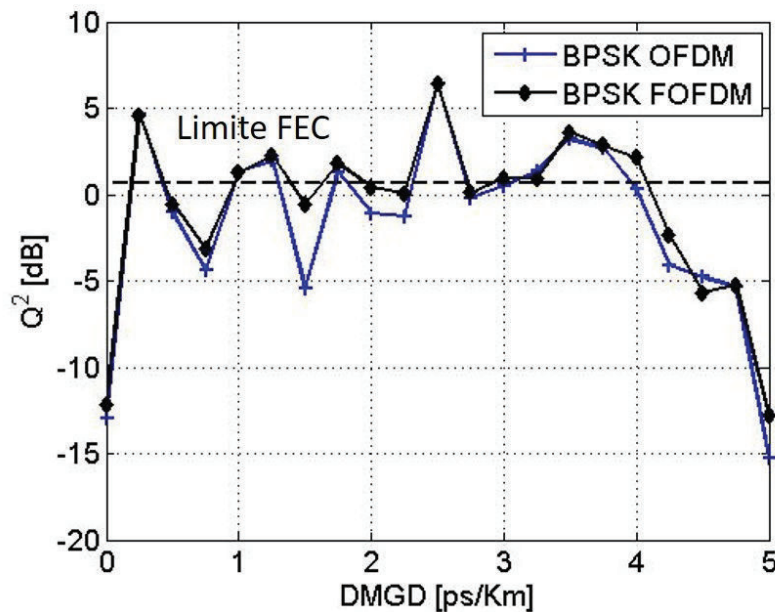


Figura 4. 4 Comparación del desempeño del sistema óptico al variar el DMGD de la fibra óptica de pocos modos para los sistemas multiportadora OFDM y FOFDM a $BER=1 \cdot 10^{-3}$.

Se puede observar que el sistema tiene un comportamiento oscilante alrededor del límite FEC, este se debe a que BPSK es una modulación digital más robusta que QPSK y 16-QAM, por lo cual tiende a mantener el desempeño del sistema. Así también se ve un comportamiento similar entre OFDM y FOFDM confirmando que no hay una diferencia significativa entre ellas.

En segundo lugar se realizó la simulación de OFDM y FOFDM para la modulación digital QPSK, manteniendo fija la potencia de entrada óptica a 0 dBm y la potencia de entrada de radio frecuencia para ambas a 4.6 dBm, la Figura 4.5 muestra el resultado de la comparación y el límite FEC que corresponde a un factor Q^2 de 4.08 dB.

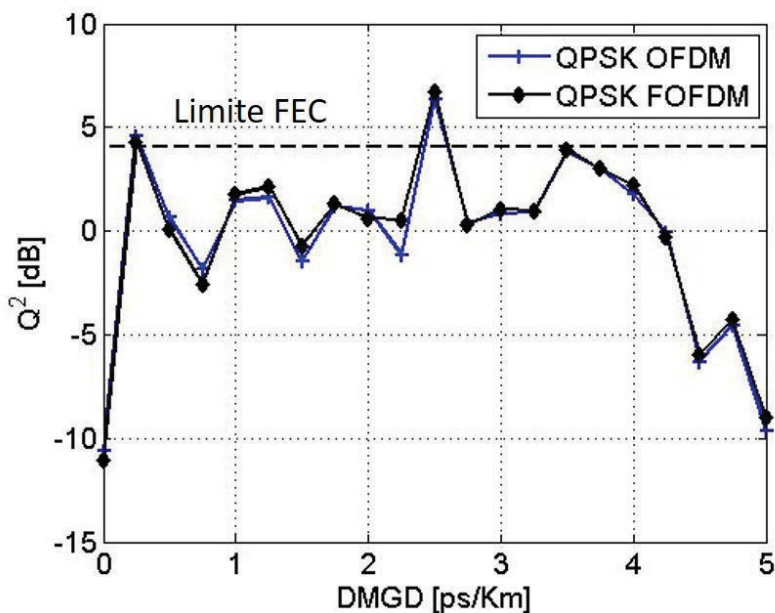


Figura 4. 5 Comparación del desempeño del sistema óptico al variar el DMGD de la fibra óptica de pocos modos para los sistemas multiportadora OFDM y FOFDM a $BER=1 \cdot 10^{-3}$.

En la figura se observa que el sistema en su mayor parte se mantiene por debajo del límite FEC, este se debe a que QPSK es una modulación digital menos robusta que BPSK y es más sensible a la variación de fase y ruido, por lo cual no tiende a mantener el desempeño del sistema. Como en el caso anterior, se ve un comportamiento similar entre OFDM y FOFDM para la modulación digital QPSK.

Finalmente, se realizó la simulación de OFDM y FOFDM para la modulación digital 16QAM, manteniendo fija la potencia de entrada óptica a 0 dBm y la potencia de

entrada de radio frecuencia para ambas a 4.5 dBm, la Figura 4.6 muestra el resultado de la comparación y el limite FEC que corresponde a un factor Q^2 de 11.47 dB.

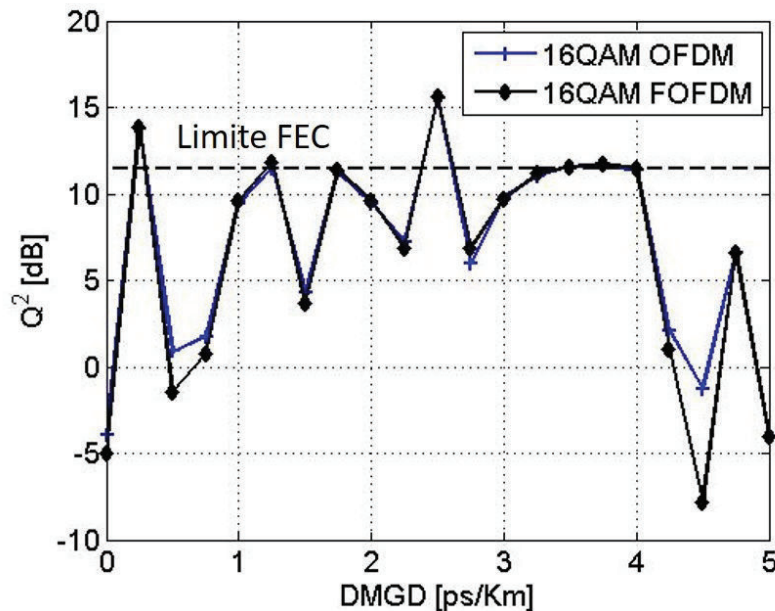


Figura 4. 6 Comparación del desempeño del sistema óptico al variar el DMGD de la fibra óptica de pocos modos para los sistemas multiportadora OFDM y FOFDM a $BER=1 \cdot 10^{-3}$.

En la figura se observa que el sistema en su mayor parte se mantiene por debajo del límite FEC. Sin embargo, hay una mejora respecto a la modulación QPSK ya que hay más puntos que se mantienen en el límite FEC, esto corrobora el mejor desempeño del sistema en órdenes altos de modulación con codificación STBC. Como en el caso anterior, se ve un comportamiento similar entre OFDM y FOFDM para la modulación digital 16QAM.

En todas las simulaciones realizadas respecto a la variación del DMGD para cada una de las diferentes modulaciones digitales, no se observa una gran diferencia en el comportamiento que tienen las modulaciones multiportadoras OFDM y FOFDM, además, se observa que el desempeño del sistema de radio sobre fibra depende del valor que tenga el DMGD y la modulación digital que se use. También, se tienen fuertes degradaciones del sistema a medida que se incrementa el DMGD esto se explica debido a que el ecualizador usado es solo de un tap y no usa símbolos anteriores para ecualizar los símbolos recibidos.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

Del trabajo realizado y explicado a lo largo de esta tesis, se han obtenido varias conclusiones y se han generado recomendaciones, las mismas que se enumeran a continuación:

- Se desarrolló un sistema numérico de co-simulación entre Optsim y Matlab para la implementación de un sistema de radio sobre fibra óptica de pocos modos, que usa modulaciones multiportadora OFDM y FOFDM; el mismo que permite configurar diferentes modulaciones digitales (B-PSK, Q-PSK y 16-QAM), potencias y frecuencias, tanto ópticas como de radio frecuencia.
- Se implementó un modelo numérico de fibra óptica de pocos modos, enfocada a la fibra óptica de dos modos, basado en la ecuación no lineal de Schrödinger acoplada (CNLSE), la cual usa el método Split Step Fourier para su solución numérica; ésta permite variar los parámetros de atenuación, dispersión, retardo de grupo modal diferencial (DMGD), la distancia y el acoplamiento modal, el mismo fue validado mediante simulaciones numéricas y comparadas con las respuesta teóricas esperadas bien conocidas por la comunidad científica.
- Para mitigar el deterioro de las señales multiportadoras producido por el acoplamiento modal y el retardo de modo diferencial de la fibra óptica de pocos modos, se implementó el codificador STBC de Alamouti, el cual permitió realizar la comunicación sobre los modos linealmente polarizados LP01 y LP11; estos fueron unidos y posteriormente separados mediante un multiplexor y demultiplexor modal cuasi ideal, la separación de las señales multiportadoras se realizó mediante un decodificador STBC implementado mediante un receptor Zero Forcing.

- Algoritmos de sincronización y estimación del canal basado en secuencias de entrenamiento óptimas fueron utilizados, con el fin de estimar el canal de fibra óptica de pocos modos; así también, la ecualización del canal se realizó utilizando el algoritmo Least Square Estimation, que permite reducir la complejidad computacional ya que no toma en consideración el ruido del sistema. Sin embargo, al ser un sistema óptico el ruido es mucho menor que en un sistema inalámbrico, por lo tanto, este tiene un mejor desempeño. Cabe destacar que estos algoritmos pueden ser usados en ambas modulaciones multiportadora sin diferencias significativas en el desempeño del sistema.
- Se caracterizó el sistema de transmisión óptica para las dos modulaciones multiportadoras respecto a la potencia óptica recibida en contra del EVM, encontrándose un comportamiento igual pero recíproco entre los modos LP01 y LP11 tanto para OFDM como FOFDM, esto debido al acoplamiento modal en la fibra óptica de pocos modos. Se encontró que OFDM tiene un mejor desempeño en casi un 2% respecto a FOFDM para cada una de las modulaciones digitales.
- Las potencias de entrada de radio frecuencia de las dos modulaciones multiportadoras fueron evaluadas mediante el factor de calidad Q^2 , para lo cual, se tomó como referencia la potencia de OFDM, ya que esta fue la menor, esto permitió encontrar que los sistemas OFDM y FOFDM tienen un comportamiento similar cuando se sobrepasa el límite FEC de $1 \cdot 10^{-3}$ para modulaciones digitales de orden bajo y es igual para sistemas de orden alto. Sin embargo, este comportamiento está supeditado al grado de acoplamiento y el retardo de grupo modal diferencial, en consecuencia se puede afirmar que, las diferencias entre los sistemas ópticos basados en multiportadoras OFDM y FOFDM y fibra óptica de pocos modos con bajo retardo de grupo modal diferencial no son significativas.

5.2 RECOMENDACIONES

- El proceso de co-simulación entre Matlab y Optsim requiere el uso de archivos .dta para cargar las variables a simular y que son pedidas al usuario, estas están ubicadas en X:\RSoft\products\optsim\block_mode\usermodels y es preferible no cambiar de directorio los archivos ya que genera errores en el path del sistema.
- Al transferir datos y variables desde y a hacia Optsim y desde y a hacia Matlab, es necesario asegurarse que el número de muestras, la frecuencia de muestreo y los campos de las estructuras sean las mismas, debido a que Optsim no permite hacer una depuración del código y si este tiene alguna incompatibilidad Optsim la detecta pero ejecuta la simulación, dando resultados erróneos.
- Al implementar el modelo de fibra óptica de pocos modos basado en la CNLSE es necesario la solución de la matriz que contiene los términos del acoplamiento intramodal e intermodal, esta al ser de tipo exponencial crece rápidamente por lo que se deben elegir valores adecuados que no hagan que la simulación corra indefinidamente o termine con valores erróneos.
- En trabajos futuros sería conveniente comparar con otros decodificadores STBC como por ejemplo V-BLAST y usar un decodificador MMSE (Minimum Mean Square Error) que si considera el ruido del sistema. Esto permitiría conocer cuánto procesamiento más es necesario y si se puede implementar en sistemas en tiempo real.
- Otro aspecto a considerar es el uso de otros modos degenerados como por ejemplo: LP11a y LP11b u otros no degenerados de orden superior como LP13 o LP23, y evaluar su desempeño para fibra de pocos modos con altos DMGD.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] D. Novak and R. Waterhouse, "Advanced radio over fiber network technologies," *Opt. Express*, vol. 21, no. 19, p. 23001, 2013.
- [2] M. Zhu, L. Zhang, J. Wang, L. Cheng, C. Liu, and G. K. Chang, "Radio-over-fiber access architecture for integrated broadband wireless services," *J. Light. Technol.*, vol. 31, no. 23, pp. 3614–3620, 2013.
- [3] A. Goldsmith, *Wireless communications*, 1st ed. New York: Cambridge University Press, 2005.
- [4] E. . Dahlman, S. Parkvall, and J. Skold, *4G LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband*, 1st ed., vol. 1, no. 3. Oxford: Elsevier, 2014.
- [5] W. Shieh, H. Bao, and Y. Tang, "Coherent optical OFDM: theory and design.," *Opt. Express*, vol. 16, no. 2, pp. 841–859, 2008.
- [6] J. Zhao and a. D. Ellis, "A novel optical fast OFDM with reduced channel spacing equal to half of the symbol rate per carrier," *Opt. Fiber Commun. (OFC), collocated Natl. Fiber Opt. Eng. Conf. 2010 Conf.*, no. 2, pp. 1–3, 2010.
- [7] K. Li and I. Darwazeh, "System performance comparison of Fast-OFDM system and overlapping Multi-carrier DS-CDMA scheme."
- [8] S. K. Ibrahim, J. Zhao, D. Rafique, J. a. O'Dowd, and A. D. Ellis, "Demonstration of world-first experimental optical fast OFDM system at 7.174Gbit/s and 14.348Gbit/s," *Eur. Conf. Opt. Commun. ECOC*, vol. 1–2, pp. 14–16, 2010.
- [9] J. Zhao, "Intensity-Modulation Full-Field Detection Optical Fast OFDM," *J. Opt. Commun. Netw.*, vol. 5, no. 5, p. 465, 2013.
- [10] E. Giacomidis, S. K. Ibrahim, J. Zhao, J. L. Wei, J. M. Tang, a D. Ellis, and I. Tomkos, "Effect of ADC on the performance of optical fast-OFDM in MMF/SMF-based links," *Prog. Electromagn. Res. Symp.*, pp. 411–414, 2011.
- [11] D. Wang, C. Lei, R. Luo, H. Chen, M. Chen, S. Yang, and S. Xie, "16QAM Optical Fast-OFDM Transmission System Based on Discrete Fourier Transform and Frequency Multiplexing," no. July, pp. 445–446, 2014.
- [12] R. J. Essiambre and R. W. Tkach, "Capacity trends and limits of optical communication networks," in *Proceedings of the IEEE*, 2012, vol. 100, pp.

- 1035–1055.
- [13] R. J. Essiambre and R. W. Tkach, “Capacity trends and limits of optical communication networks,” in *Proceedings of the IEEE*, 2012, vol. 100, pp. 1035–1055.
 - [14] T. Morioka, D. T. U. Fotonik, R. Ryf, and P. Winzer, “Enhancing Optical Communications with Brand New Fibers,” *Commun. Mag. IEEE*, no. February, pp. 31–42, 2012.
 - [15] A. D. Ellis, “The MODE-GAP project,” *2013 IEEE Photonics Conf.*, vol. 2, no. 2, pp. 299–300, Sep. 2013.
 - [16] N. K. Fontaine, “Devices and Components for Space-Division Multiplexing in Few-Mode Fibers,” in *Optical Fiber Communication Conference/National Fiber Optic Engineers Conference 2013*, 2013, no. IL, p. OTh1B.3.
 - [17] N. K. Fontaine, C. R. Doerr, M. A. Mestre, R. R. Ryf, P. J. Winzer, L. L. Buhl, Y. Sun, X. Jiang, and R. L. Jr, “Space-division multiplexing and all-optical MIMO demultiplexing using a photonic integrated circuit,” no. c, pp. 2–4, 2012.
 - [18] M. Salsi, C. Koebele, G. Charlet, and S. Bigo, “Mode Division Multiplexed Transmission with a weakly-coupled Few-Mode Fiber - OSA Technical Digest,” in *Optical Fiber Communication Conference*, 2012, p. OTu2C.5.
 - [19] M. Salsi, C. Koebele, D. Sperti, P. Tran, P. Brindel, H. Mardoyan, S. Bigo, A. Boutin, F. Verluise, P. Sillard, M. Bigot-Astruc, L. Provost, F. Cerou, and G. Charlet, “Transmission at 2x100Gb/s, over Two Modes of 40km-long Prototype Few-Mode Fiber, using LCOS based Mode Multiplexer and Demultiplexer,” *Opt. Fiber Commun. Conf. Fiber Opt. Eng. Conf. 2011*, p. PDPB9, 2011.
 - [20] S. Randel, R. Ryf, and A. Gnauck, “Mode-multiplexed 6× 20-GBd QPSK transmission over 1200-km DGD-compensated few-mode fiber,” in *Optical Fiber Communication Conference*, 2012, p. PDP5C.5.
 - [21] G. P. Agrawal, *Fiber-Optic Communications Systems, Third Edition.*, 3rd ed., vol. 6. New York: John Wiley & Sons, INC., 2002.
 - [22] J. M. Senior and M. Y. Jamro, *Optical Fiber Communications: Principles and Practice*, 3rd ed. Pearson Education, 2009.
 - [23] T. Sakamoto, T. Mori, T. Yamamoto, N. Hanzawa, S. Tomita, F. Yamamoto, K. Saitoh, and M. Koshihara, “Mode-division multiplexing transmission system

- with DMD-independent low complexity MIMO processing,” *J. Light. Technol.*, vol. 31, no. 13, pp. 2192–2199, 2013.
- [24] A. Li, A. Al Amin, X. Chen, S. Chen, G. Gao, and W. Shieh, “Reception of Dual-Spatial-Mode CO-OFDM Signal Over a Two-Mode Fiber,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 30, no. 4, pp. 634–640, 2012.
- [25] N. Riesen and J. D. Love, “Dispersion equalisation in few-mode fibres,” *Opt. Quantum Electron.*, vol. 42, no. May, pp. 577–585, 2011.
- [26] F. M. Ferreira, D. Fonseca, and H. J. a Da Silva, “Design of few-mode fibers with M-modes and low differential mode delay,” *J. Light. Technol.*, vol. 32, no. 3, pp. 353–360, 2014.
- [27] H. Mohapatra and S. I. Hosain, “Intermodal dispersion free few-mode (quadruple mode) fiber: A theoretical modelling,” *Opt. Commun.*, vol. 305, pp. 267–270, Sep. 2013.
- [28] M. Li, B. Hoover, S. Li, S. Bickham, S. Ten, E. Ip, and Y. Huang, “Low Delay and Large Effective Area Few-Mode Fibers for Mode-Division Multiplexing,” no. July, pp. 495–496, 2012.
- [29] H. Kubota and T. Morioka, “Few-mode optical fiber for mode-division multiplexing,” *Opt. Fiber Technol.*, vol. 17, no. 5, pp. 490–494, Oct. 2011.
- [30] P. J. Winzer and G. J. Foschini, “MIMO capacities and outage probabilities in spatially multiplexed optical transport systems,” *Opt. Express*, vol. 19, no. 17, p. 16680, 2011.
- [31] D. J. Richardson, J. M. Fini, and L. E. Nelson, “Space-division multiplexing in optical fibres,” *Nat. Photonics*, vol. 7, no. 5, pp. 354–362, Apr. 2013.
- [32] L. Palmieri and A. Galtarossa, “Twist effects in multi-mode fibers,” *2014 Third Mediterr. Photonics Conf.*, pp. 1–3, 2014.
- [33] D. Gesbert, M. Shafi, D. Shiu, P. J. Smith, and A. Naguib, “From Theory to Practice: An Overview of Space-Time Coded MIMO Wireless Systems,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 21, no. 3, pp. 281–302, 2003.
- [34] M. Jankiraman, *Space-time Codes and MIMO Systems*, 1st ed. Boston: ARTECH HOUSE, 2004.
- [35] K. H. B. E. N. L. Etaief, H. O. N. G. K. Ong, U. N. Of, and T. Echnology, “4G WIRELESS APPLICATIONS SPACE-TIME / FREQUENCY CODING FOR MIMO-OFDM IN NEXT GENERATION BROADBAND W

- IRELESS SYSTEMS XIANG-GEN XIA, UNIVERSITY OF DELAWARE,”
Wirel. Commun. IEEE, no. June, pp. 32–43, 2007.
- [36] S. M. Alamouti, “A simple transmit diversity technique for wireless communications,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 16, no. 8, pp. 1451–1458, 1998.
- [37] S. M. Alamouti, “A simple transmit diversity technique for wireless communications,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 16, 1998.
- [38] H. Sampath, S. Talwar, J. Tellado, V. Erceg, and A. Paulraj, “A fourth-generation MIMO-OFDM broadband wireless system: Design, performance, and field trial results,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 40, no. 9, pp. 143–149, 2002.
- [39] J. Leibrich, A. Ali, and W. Rosenkranz, “Optical OFDM as a Promising Technique for Bandwidth-Efficient High-Speed Data Transmission over Optical Fiber,” *Proc. 12th Int. OFDM-Workshop*, 2007.
- [40] A. J. Lowery and J. Armstrong, “Orthogonal-Frequency-Division Multiplexing for Optical Dispersion Compensation,” *OFC/NFOEC 2007 - 2007 Conf. Opt. Fiber Commun. Natl. Fiber Opt. Eng. Conf.*, pp. 1–3, Mar. 2007.
- [41] D. Karampatsis, M. R. D. Rodrigues, and I. Darwazeh, “Implications of linear phase dispersion on OFDM and Fast-OFDM systems,” *London Commun. Symp. UCL*, no. 2, 2002.
- [42] T. M. F. Alves, M. Morant, A. V. T. Cartaxo, and R. Llorente, “Transmission of OFDM wired-wireless quintuple-play services along WDM LR-PONs using centralized broadband impairment compensation,” *Opt. Express*, vol. 20, no. 13, p. 13748, 2012.
- [43] R. Llorente, M. Morant, E. Pellicer, M. Herman, Z. Nagy, J. Herrera, J. Correcher, T. Alves, A. Cartaxo, T. Quinlan, S. Walker, C. Rodrigues, P. Cluzeaud, A. Schmidt, R. Sambaraju, R. Piesiewicz, and E. Rico, “Radio-over-fiber quintuple-play service provision for deep fiber-to-the-home passive networks,” *2013 IEEE Int. Conf. Commun. Work. ICC 2013*, pp. 868–872, 2013.
- [44] R. Llorente, M. Morant, E. Pellicer, M. Herman, Z. Nagy, T. Alves, A. Cartaxo, J. Herrera, J. Correcher, T. Quinlan, S. Walker, C. Rodrigues, P. Cluzeaud, A. Schmidt, R. Piesiewicz, and R. Sambaraju, “On-the-field performance of quintuple-play long-reach OFDM-based WDM-PON optical access networks,”

- Opt. Express*, vol. 22, no. 6, p. 6203, 2014.
- [45] J. Zhao and A. D. Ellis, "Discrete-fourier transform based implementation for optical fast OFDM," *Eur. Conf. Opt. Commun. ECOC*, vol. 1–2, pp. 3–5, 2010.
- [46] Z. Y. Yang, S. Yu, L. Q. Chen, J. Zhou, and Y. J. Qiao, "QAM accommodated double-side band fast OFDM based on IDCT," vol. 21, no. 26, 2013.
- [47] E. Giacomidis, I. Tomkos, and J. M. Tang, "Performance of Optical Fast-OFDM in MMF-Based Links," vol. 1, pp. 9–10, 2011.
- [48] E. Giacomidis, a. Tsokanos, C. Mouchos, G. Zardas, C. Alves, J. L. Wei, J. M. Tang, C. Gosset, Y. Jaouën, and I. Tomkos, "Extensive Comparisons of Optical Fast-OFDM and Conventional Optical OFDM for Local and Access Networks," *J. Opt. Commun. Netw.*, vol. 4, no. 10, p. 724, 2012.
- [49] E. Giacomidis, S. K. Ibrahim, J. Zhao, J. M. Tang, A. D. Ellis, and I. Tomkos, "Experimental and Theoretical Investigations of Intensity-Modulation and Direct-Detection Optical Fast-OFDM Over MMF-Links," *Photonics Technol. Lett. IEEE*, vol. 24, no. 1, pp. 52–54, 2012.
- [50] J. Zhao and A. Ellis, "Advantage of Optical Fast OFDM Over OFDM in Residual Frequency Offset Compensation," *Photonics Technol. Lett. IEEE*, vol. 24, no. 24, pp. 2284–2287, 2012.
- [51] M. N. Tipán-Simbaña, J. M. Alfonso, L. Betancur, and F. Amaya-Fernández, "PAPR comparison between conventional OFDM and fast-OFDM on radio over fiber applications," *2013 IEEE Colomb. Conf. Commun. Comput. COLCOM 2013 - Conf. Proc.*, pp. 1–4, 2013.
- [52] A. Li, A. Al Amin, X. Chen, and W. Shieh, "Transmission of 107-Gb/s mode and polarization multiplexed CO-OFDM signal over a two-mode fiber.," *Opt. Express*, vol. 19, no. 9, pp. 8808–8814, 2011.
- [53] A. Al Amin, A. Li, S. Chen, X. Chen, G. Gao, and W. Shieh, "Dual-LP11 mode 4X4 MIMO-OFDM transmission over a two-mode fiber," *Opt. Express*, vol. 19, no. 17, pp. 16672–16679, 2011.
- [54] B. Inan, B. Spinnler, F. Ferreira, D. van den Borne, A. Lobato, S. Adhikari, V. a. J. M. Sleiffer, M. Kuschnerov, N. Hanik, and S. L. Jansen, "DSP complexity of mode-division multiplexed receivers," *Opt. Express*, vol. 20, no. 10, p. 10859, 2012.
- [55] B. Inan, B. Spinnler, F. Ferreira, A. P. Lobato Polo, S. Adhikari, V. Sleiffer, D.

- van den Borne, N. Hanik, and S. L. Jansen, "Equalizer Complexity of Mode Division Multiplexed Coherent Receivers - OSA Technical Digest," *Opt. Fiber Commun. Conf.*, no. 1, p. OW3D.4, 2012.
- [56] A. P. Lobato Polo, F. Ferreira, B. Inan, M. Kuschnerov, D. van den Borne, S. L. Jansen, B. Spinnler, and B. Lankl, "The Impact of Differential Mode Delay on Mode-Division Multiplexed Coherent Optical OFDM Transmission - OSA Technical Digest," *Opt. Fiber Commun. Conf.*, no. 1, p. OTu2C.2, 2012.
- [57] B. Inan, Y. Jung, and V. Sleiffer, "Low Computational Complexity Mode Division Multiplexed OFDM Transmission over 130 km of Few Mode Fiber," in *Optical Fiber Communication Conference*, 2013, p. OW4F.4.
- [58] C. M. Serpa-imbett, J. Marín-alfonso, C. Gomez-santamaria, L. Betancur, and F. Amaya-, "Performance of spatially multiplexed systems based on numerical simulations of OFDM-MIMO in a two- core fiber with low coupling , and a few mode fiber with high DGD," *Microw. Optoelectron. Conf. (IMOC), 2013 SBMO/IEEE MTT-S Int.*, 2013.
- [59] Y. Chen, J. Li, P. Zhu, Z. Wu, P. Zhou, Y. Tian, F. Ren, J. Yu, D. Ge, J. Chen, Y. He, and Z. Chen, "Novel MDM-PON scheme utilizing self-homodyne detection for high-speed/capacity access networks," *Opt. Express*, vol. 23, no. 25, p. 32054, 2015.
- [60] F. Ren, J. Li, T. Hu, R. Tang, J. Yu, Q. Mo, Y. He, Z. Chen, and Z. Li, "Cascaded Mode-Division-Multiplexing and Time-Division-Multiplexing Passive Optical Network Based on Low Mode-Crosstalk FMF and Mode MUX/DEMUX," *IEEE Photonics J.*, vol. 7, no. 5, pp. 1–9, 2015.
- [61] T. Mizuno, H. Takara, A. Sano, and Y. Miyamoto, "Dense Space-Division Multiplexed Transmission Systems Using Multi-Core and Multi-Mode Fiber," *J. Light. Technol.*, vol. 34, no. 2, pp. 582–592, 2016.
- [62] C. Koebele, M. Salsi, G. Charlet, and S. Bigo, "Nonlinear effects in long-haul transmission over bimodal optical fibre," *Opt. Commun. (ECOC), 2010 36th Eur. Conf. Exhib.*, 2010.
- [63] F. Ferreira, P. Monteiro, and H. Silva, "Semi-analytical model for linear modal coupling in few-mode fiber transmission," *Int. Conf. Transparent Opt. Networks*, no. 2, pp. 4–7, 2012.
- [64] C. Koebele, "Mode-division-multiplexing as a possibility to cope with the

- increasing capacity demand in optical transmission systems,” 2012.
- [65] L. Deng, X. Pang, Y. Zhao, M. B. Othman, J. B. Jensen, D. Zibar, X. Yu, D. Liu, and I. T. Monroy, “2x2 MIMO-OFDM Gigabit fiber-wireless access system based on polarization division multiplexed WDM-PON,” *Opt. Express*, vol. 20, no. 4, p. 4369, 2012.
- [66] W. J. Fang, X. G. Huang, and G. Li, “A full duplex radio-over-fiber transmission of OFDM signals at 60 GHz employing frequency quintupling optical up-conversion,” *Opt. Commun.*, vol. 294, pp. 118–122, 2013.
- [67] M. Biguesh and A. B. Gershman, “Training-based MIMO channel estimation: A study of estimator tradeoffs and optimal training signals,” *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 54, no. 3, pp. 884–893, 2006.
- [68] E. Ip, M. J. Li, W. Wood, J. Hu, and Y. Yano, “Temporal variations in the channel matrix in few-mode fiber recirculating loop transmission,” *2013 IEEE Photonics Soc. Summer Top. Meet. Ser. PSSTMS 2013*, pp. 121–122, 2013.
- [69] E. Masoud, *Space-Time Block Coding for Wireless Communications*. 2008.
- [70] 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.
- [71] Agilent, “8 Hints for Making and Interpreting EVM Measurements Application Note,” *Appl. NOte*, 2005.
- [72] L. Grüner-nielsen, Y. Sun, S. Member, J. W. Nicholson, D. Jakobsen, K. G. Jespersen, R. Lingle, and B. Pálsdóttir, “Few Mode Transmission Fiber With Low DGD , Low Mode coupling and Low Loss,” *J. Light. Technol.*, vol. 30, no. 23, pp. 3693–3698, 2012.

7. ANEXOS

7.1 ANEXO 1: PANTALLAS DE CO-SIMULACIÓN

Se presenta las pantallas del sistema implementado en Optisim, cuyos iconos en azul son de este software y los de icono de Matlab son los de co-simulación.

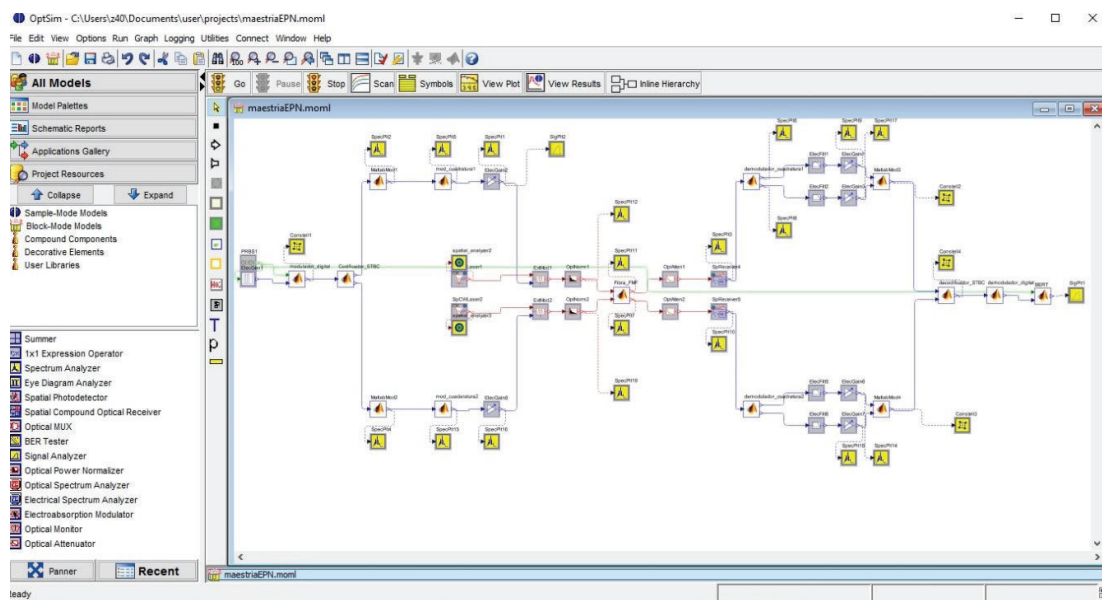


Figura 7.1 Sistema de co-simulación

De igual manera se presentan las pantallas de ingreso de datos de los módulos de co-simulación:

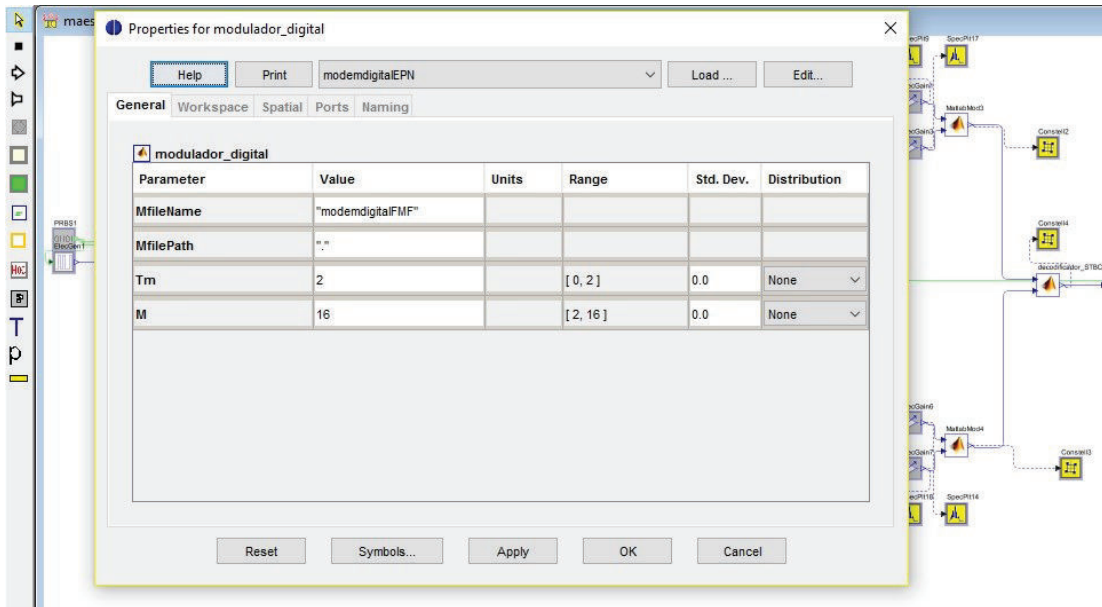


Figura 7.2 Modulador digital

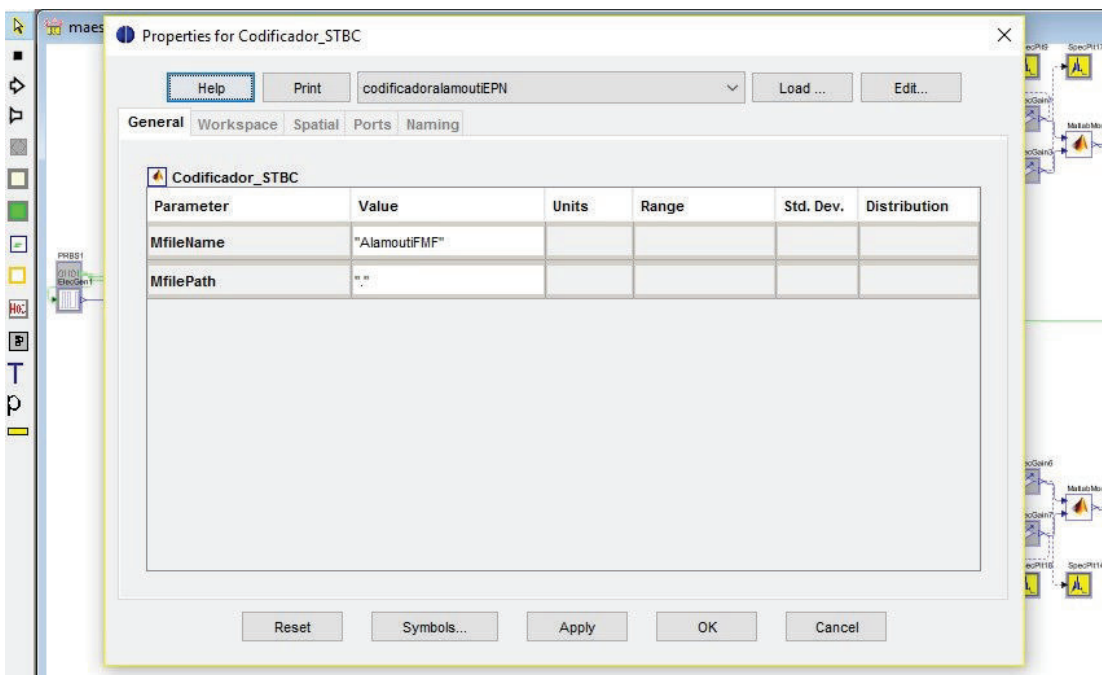


Figura 7.3 Codificador STBC (Alamouti)

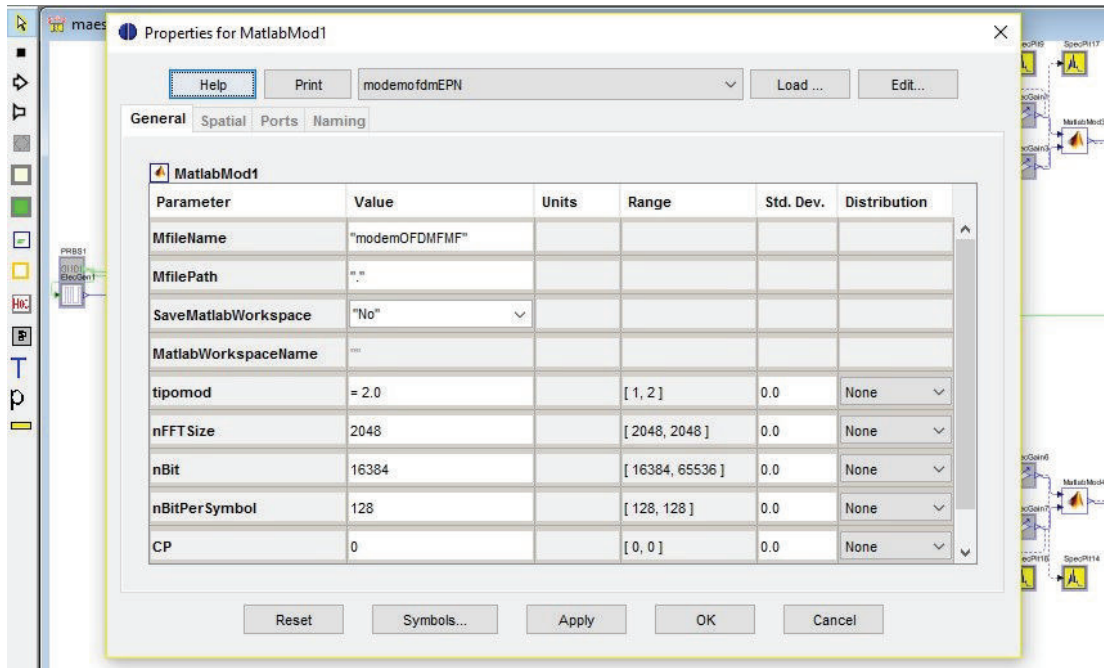


Figura 7.4 Modulador OFDM/FOFDM

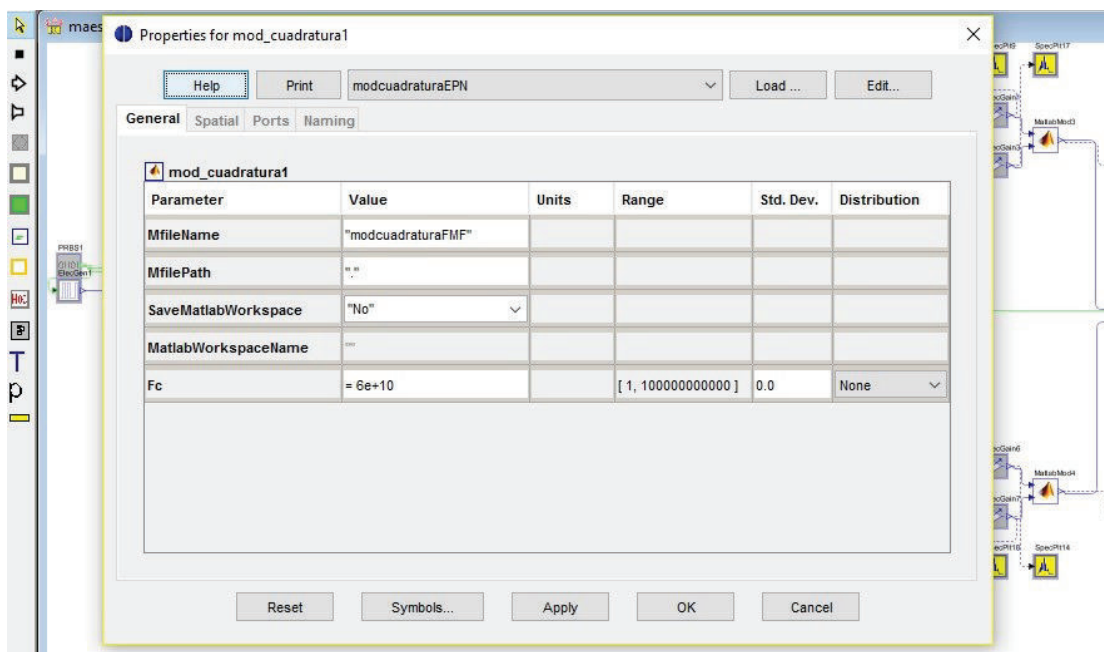


Figura 7.5 Modulador en cuadratura

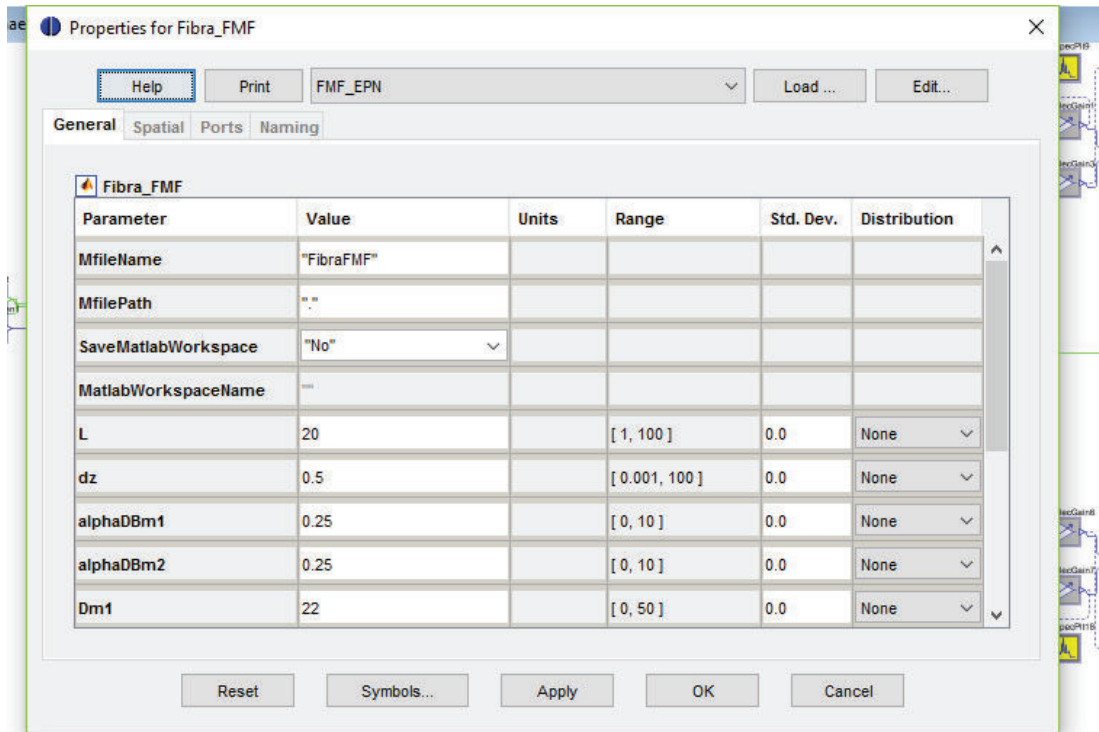


Figura 7.6 Modulador en cuadratura

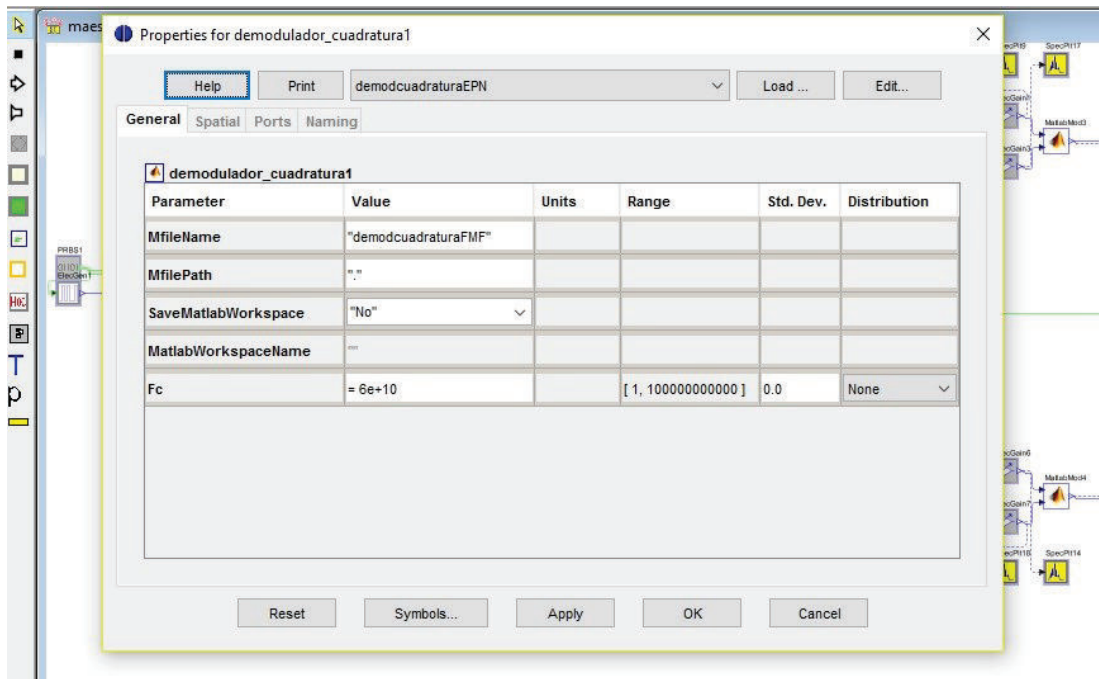


Figura 7.7 Demodulador en cuadratura

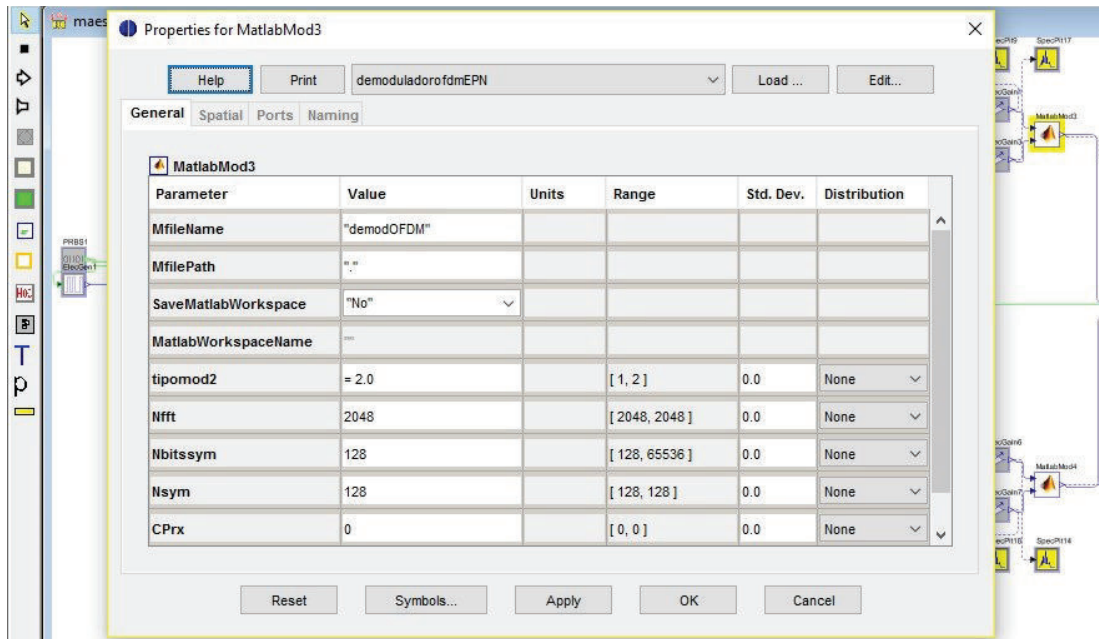


Figura 7.8 Demodulador OFDM/FOFDM

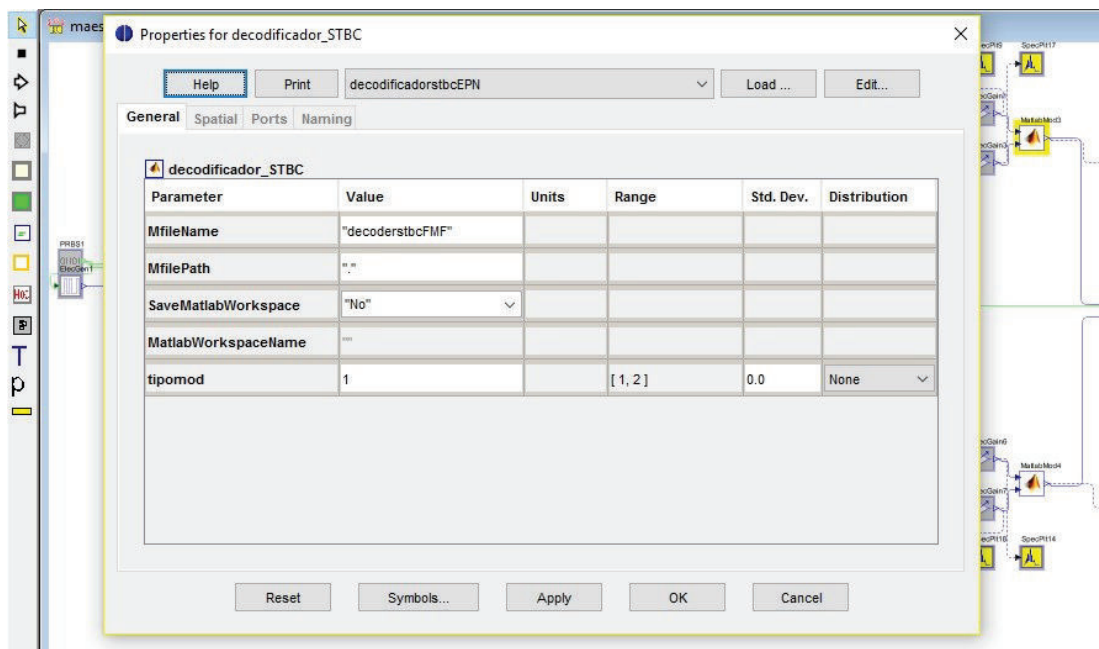


Figura 7.9 Decodificador STBC (Zero Forcing)

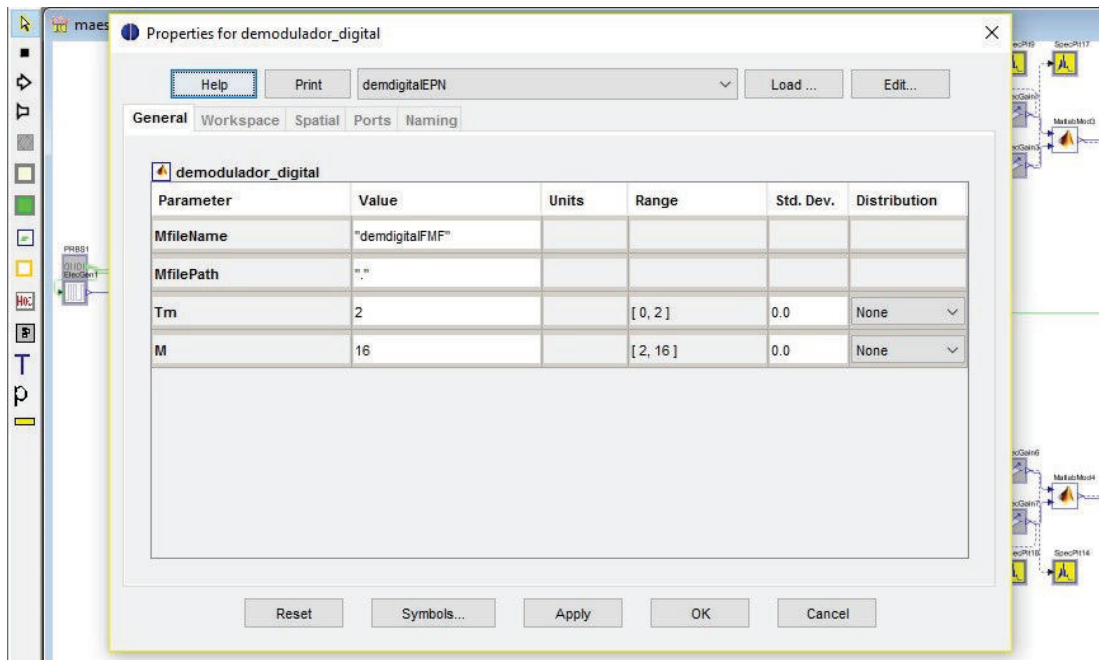


Figura 7.10 Demodulador Digital

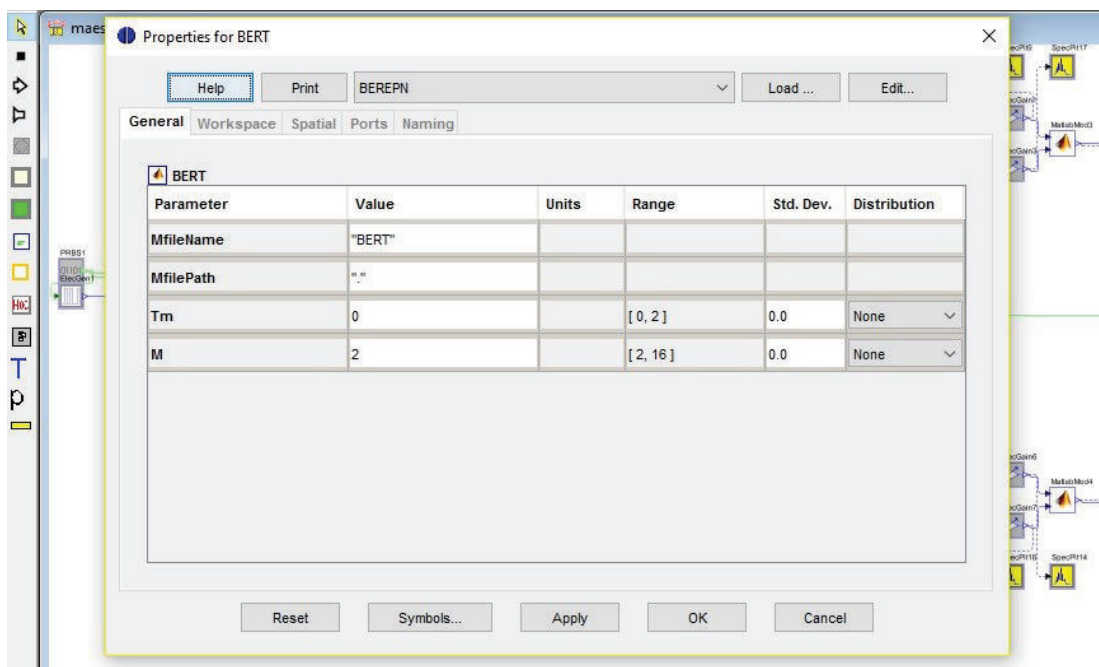


Figura 7.11 Medidor de Errores

7.2 ANEXO 2: ALGORÍTMOS DE CO-SIMULACIÓN

En este anexo se presentan los algoritmos que se usaron para la generación del software de co-simulación.

Para el modulo transmisor se usaron dos bloques de co-simulación: modulador digital y el codificador STBC de Alamouti. A continuación se presentan los algoritmos para el módulo transmisor:

Algoritmo 1 modemdigitalFMF

```

Paso 1      Variables:
              Matriz decimales: data,symbols,symbols_tx,bitSequence
              Entero:Tm,M
Paso 2      INICIO
Paso 3      LEA(bitSequence,Tm,M)
Paso 4      data= bitSequence
Paso 5      symbols=modemdigital(data,Tm,M)
Paso 6      Para i desde 1 hasta 16
              symbols_tx (i)=symbols
Paso 7      fin (para)
Paso 8      retorna(symbols_tx)
Paso 9      FIN INICIO
Fin(modemdigitalFMF)

```

Algoritmo 2 Función modemdigital(data,Tm,M)

```

Paso 1      Variables:
              Matriz decimal: data,X
              Entero:Tm,M
Paso 2      INICIO
Paso 3      LEA(data,Tm,M)
Paso 4      según(Tm){
              caso 1: X=modulación psk(data,M)
              caso 2: X=modulación qam(data,M)
              defecto: X=modulación bpsk(data,M)}
Paso 5      fin (según)
Paso 6      retorna(X)
Paso 7      FIN INICIO
Fin(modemdigital)

```

Algoritmo 3 AlamoutiFMF

```

Paso 1      Variables:
              Matriz decimal: samples,sym_rx,sym_code
Paso 2      INICIO
Paso 3      LEA(samples)
Paso 4      sym_rx= samples
Paso 5      sym_code=Alamouti(sym_rx,'1')
Paso 8      retorna(sym_code)
Paso 9      FIN INICIO
Fin(AlamoutiFMF)

```

```
-----
Algoritmo 4 Función Alamouti(modulated_symbols,rate)
-----
```

```
Paso 1      Variables:
            Matriz decimal: modulated_symbols,modulate_coded_symbols
            Entero:rate

Paso 2      INICIO
Paso 3      LEA(modulated_symbols,rate)
Paso 4      Si rate=1 y modulated_symbols ≠ de vacío entonces
Paso 5      Para i desde 1 en pasos de dos hasta fin longitud de
            modulate_symbols
            modulate_coded_symbols(1,i)=modulated_symbols(i)
            fin(para)
            Para i desde 2 en pasos de dos hasta fin longitud de
            modulate_symbols
            modulate_coded_symbols(2,i)=modulated_symbols(i)
            fin(para)
            Para i desde 2 en pasos dos hasta fin longitud de
            modulate_coded_symbols
            modulate_coded_symbols( (:,i)=
            conj(modulate_coded_symbols( (:,i))
            fin(para)
Paso 6      fin (Si)
Paso 8      retorna(modulate_coded_symbols())
Paso 9      FIN INICIO
Fin(Alamouti)
```

Para el módulo modulador, se usaron dos bloques de co-simulación: modulador OFDM/FOFDM y el modulador en cuadratura. A continuación se presentan los algoritmos para el módulo modulador:

```
-----
Algoritmo 5 modemOFDMFMF
-----
```

```
Paso 1      Variables:
            Matriz decimal: samples,sym_tx,sym_tx2
            Entero: nFFTSize,nBit,nBitPerSymbol,CP,tipomod

Paso 2      INICIO
Paso 3      LEA(samples,nFFTSize,nBit,nBitPerSymbol,CP,tipomod)
Paso 4      sym_tx=samples
Paso 5      sym_tx2=longitud de sym_tx/16
Paso 5      xofdm=modemFMF(sym_tx2,nFFTSize,nBit,nBitPerSymbol,CP,tipomod)
Paso 8      retorna(xofdm)
Paso 9      FIN INICIO
Fin(AlamoutiFMF)
```

```
-----
Algoritmo 6 Función
modemFMF(sym_tx,nFFTSize,nBit,nBitPerSymbol,CP,typmod)
-----
```

```
Paso 1      Variables:
            Matriz decimal: sym_tx,xfofdm,inputiFFT,OutputiFFT,xprbs
            xsync
            Entero: nFFTSize,nBit,nBitPerSymbol,CP,typmod
Paso 2      INICIO
```

```

Paso 3      LEA(sym_tx,nFFTSize,nBit,nBitPerSymbol,CP,typmod)
Paso 4      Si typmod=1 entonces
              inputiFFT= iFFT(sym_tx)
              OutputiFFT=inputiFFT(fin-CP hasta fin),inputiFFT
            Si No entonces
              inputiFFT= idct(sym_tx)
              OutputiFFT=inputiFFT(fin-CP hasta fin),inputiFFT
Paso 5      fin (Si)
Paso 6      xprbs=PRBS(7,6)
Paso 7      xsync=xprbs(1),...,xprbs(16)
Paso 8      xfofdm= xsync,zeros(2048),OutputiFFT
Paso 9      retorna (xfofdm)
Paso 10     FIN INICIO
Fin(modemFMF)

```

```

-----
Algoritmo 7 modcuadraturaFMF
-----

```

```

Paso 1      Variables:
              Matriz decimal:insignal,samples
              Decimal: Fc,Fs
Paso 2      INICIO
Paso 3      LEA(samples,insignal,Fc,Fs)
Paso 4      outsignal=modcuadratura(insignal,Fc,Fs)
Paso 5      retorna(outsignal)
Paso 6      FIN INICIO
Fin(modcuadraturaFMF)

```

```

-----
Algoritmo 8 Función modcuadratura( insignal,Fc,Fs )
-----

```

```

Paso 1      Variables:
              Matriz decimal: insignal
              Decimal: Fc,Fs
Paso 2      INICIO
Paso 3      LEA(insignal,Fc,Fs)
Paso 4      outsignal= insignal*cos(2πFc/Fs)+ insignal*sin(2πFc/Fs)
Paso 5      retorna (outsignal)
Paso 6      FIN INICIO
Fin(modcuadratura)

```

Para el módulo transmisión óptica, se usa el bloque de co-simulación Fibra FMF, el cual, permite realizar la simulación de la fibra óptica de dos modos. A continuación se presentan los algoritmos para el módulo transmisión óptica:

```

-----
Algoritmo 7 FibraFMF
-----

```

```

Paso 1      Variables:
              Matriz decimal:u0,at1,u1,at1,betal,beta2,gamma,ux,uy,Y,
              hestFMF,inOFDM
              Decimal:R,n,Fs,Po,Ch,c,lambd,L,dz,nz,alpha1,alpha2,Dm1,
              Dm2,gamma11,gamma12,gamma13,gamma22,m

```

```

Paso 2      INICIO
Paso 3      dz,nz,alpha1,alpha2,Dm1,Dm2,gamma11,gamma12,gamma13,gamma22)
Paso 4      [u0,tu0,tu0p,du0t] = genpulsosgauss(R,n,Fs,Po,Ch,m)
Paso 5      [u1,tu1,tulp,du1t] = genpulsosgauss(R,n,Fs,Po,Ch,m)
Paso 6      at1=u0
Paso 7      at2=u1
Paso 8      alpha1 = alphaDBm1/(10*log10(exp(1)));
Paso 9      beta2m1=-1*(lamda0^2*Dm1)/(2*pi*c)
Paso 10     alpha2 = alphaDBm2/(10*log10(exp(1)))
Paso 11     beta2m2=-1*(lamda0^2*Dm2)/(2*pi*c)
Paso 12     betal=beta1m1, beta2m1
Paso 13     betal=beta1m1, beta2m1
Paso 14     gamma=gamma11,gamma12;gamma21,gamma22
Paso 15     at1(1,1)=1;
Paso 16     at2(1,1)=1;
Paso 17     at1(2,1)=1;
Paso 18     at2(2,1)=-1;
Paso 19     [ux,uy] = CNLSE2m(at1,at2,dt,dz,nz,alpha1,alpha2,betal,
                             beta2,gamma)

Paso 20     Y=ux;uy
Paso 21     hestFMF=Y(:,1:2)*pinv([1 1;1 -1]);
Paso 22     outOFDM=pinv(hest)*inOFDM;
Paso 23     retorna(OutOFDM)
Paso 24     FIN INICIO
Fin(FibraFMF)

```

Algoritmo 8 Función

CNLSE2(u0m1,u0m2,dt,dz,nz,alpham1,alpham2,betapm1,betapm2,gamma)

```

Paso 1      Variables:
             Matriz decimal: u0m1,u0m2, u1m1,u1m2,betapm1,betapm2,
                             gamma
             Decimal: dt,dz,nz,alpham1,alpham2

Paso 2      INICIO
Paso 3      LEA(u0m1,u0m2,dt,dz,nz,alpham1,alpham2,betapm1,betapm2,gamma)
Paso 4      nt = longitud de u0m1
Paso 5      w = 2*pi*(-nt/2:(nt/2-1))/(dt*nt)
Paso 6      A1=SplitStepFourier(u0m1,dt,dz,nz,alpham1,alpham2,
                             betapm1,betapm2)
Paso 7      A2=SplitStepFourier(u0m2,dt,dz,nz,alpham1,alpham2,
                             betapm1,betapm2)

Paso 8      M11=((gamma(1,1)*(A1.*conj(A1)))+
               ((gamma(1,2)*(A2.*conj(A2))))).*A1
Paso 9      M12= 1i*(2*((real(A1).*imag(A2))-(imag(A1).*real(A2)))
               *- 1i.*A2)*(gamma(1,2)/3)
Paso 10     M21= 1i*(2*((real(A2).*imag(A1))-(imag(A2).*real(A1)))
               -1i.*A1)*(gamma(2,1)/3)
Paso 11     M22=((gamma(2,1)*(A1.*conj(A1)))+
               ((gamma(2,2)*(A2.*conj(A2))))).*A2
Paso 12     Para ii desde 0 hasta longitud de A1 menos 1
             M=M11(ii+1) M12(ii+1);M21(ii+1) M22(ii+1)
             A=[A1(ii+1);A2(ii+1)]
             At=expm(M.*dz)*A
             At1=[At1 At(1)]
             At2=[At2 At(2)]

```

```

Paso 13      fin(para)
Paso 15      ulm1 = At1'
Paso 16      ulm2 = At2'
Paso 5       retorna (ulm1,ulm2)
Paso 6       FIN INICIO
Fin(CNLSE2)

```

Para el módulo demodulador, se usaron dos bloques de co-simulación: demodulador cuadratura y demodulador OFDM FOFDM. A continuación se presentan los algoritmos para el módulo demodulador:

```

-----
Algoritmo 9 demodcuadraturaFMF
-----

```

```

Paso 1      Variables:
              Matriz decimal: insignal, samples
              Decimal: Fc, Fs
Paso 2      INICIO
Paso 3      LEA(samples, insignal, Fc, Fs)
Paso 4      outsignal=demodcuadratura(insignal, Fc, Fs)
Paso 5      retorna(real(outsignal), imaginario(outsignal))
Paso 6      FIN INICIO
Fin(demodcuadraturaFMF)

```

```

-----
Algoritmo 10 Función demodcuadratura( insignal, Fc, Fs ) -----
-----

```

```

Paso 1      Variables:
              Matriz decimal: insignal
              Decimal: Fc, Fs
Paso 2      INICIO
Paso 3      LEA(insignal, Fc, Fs)
Paso 4      outsignal= insignal*cos(2πFc/Fs)+ i*insignal*sin(2πFc/Fs)
Paso 5      retorna (outsignal)
Paso 6      FIN INICIO
Fin(demodcuadratura)

```

```

-----
Algoritmo 11 demodOFDM
-----

```

```

Paso 1      Variables:
              Matriz decimal: yfofdm, samples, sym_rx, sym_rx2
              Entero: nFFTSize, nBit, nBitPerSymbol, CP, tipomod2
Paso 2      INICIO
Paso 3      LEA(samples, nFFTSize, nBit, nBitPerSymbol, CP, tipomod2)
Paso 4      yfofdm=samples
Paso 5      sym_rx=demodemFMF(yfofdm, CPrx, Nfft, Nsym, Nbitssym, tipomod2)
Paso 6      sym_rx2=sym_rx(1)... sym_rx(16)
Paso 7      retorna(sym_rx2)
Paso 8      FIN INICIO
Fin(demodOFDM)

```

```
-----
Algoritmo 12 Función demodemFMF(yfofdm,CPrx,Nfft,Nsym,Nbits,typmod2)
-----
```

```
Paso 1      Variables:
            Matriz decimal: sym_rx, yfofdm
            Entero: nFFTSsize,nBit,nBitPerSymbol,CP,typmod2
Paso 2      INICIO
Paso 3      LEA(yfofdm, nFFTSsize,nBit,nBitPerSymbol,CP,typmod2)
Paso 4      Si typmod2=1 entonces
            xprbs=PRBS(7,6)
            xsync=xprbs(1),...,xprbs(16)
            yfofdm_rx = yfofdm sin sync
            yfofdm_sym=yfofdm sin CP
            sym_rx=fft(yfofdm_sym)
            Si No entonces
            xprbs=PRBS(7,6)
            xsync=xprbs(1),...,xprbs(16)
            yfofdm_rx = yfofdm sin xsync
            yfofdm_sym=yfofdm sin CP
            sym_rx=dct(yfofdm_sym)
Paso 5      fin (Si)
Paso 6      retorna (sym_rx)
Paso 7      FIN INICIO
Fin(demodemFMF)
```

Para el módulo receptor, se usaron tres bloques de co-simulación: decodificador STBC, demodulador digital y BERT. A continuación se presentan los algoritmos para el módulo receptor:

```
-----
Algoritmo 13 decoderSTBC
-----
```

```
Paso 1      Variables:
            Matriz decimal: samples1, samples2,symstbcmlrx,
                           symstbcm2rx,symstbc1,h,hest,H,sym1,
                           sym2,Y,xest,symest,simtx,Heq,symeq,
                           symestout
Paso 2      INICIO
Paso 3      LEA(samples,hest,samples1,samples2)
Paso 4      symstbcmlrx=samples1
Paso 5      symstbcm2rx=samples2
Paso 6      symstbc= symstbcmlrx,symstbcm2rx
Paso 7      sym1=symstbc(impares)
Paso 8      sym2=symstbc(pares)
Paso 9      Y=sym1;conjugado(sym2)
Paso 10     h=hest
Paso 11     h1=conj(h(1,2)) -1*conj(h(1,1));conj(h(2,2)) -1*conj(h(2,1))
Paso 12     H=h;h1
Paso 13     symest=pinv(H)*Y;
Paso 14     Heq=symest/simtx;
Paso 15     symeq=Heq*symest
Paso 16     symestout=symeq(1)... symeq(16)
Paso 17     retorna(symestout)
Paso 18     FIN INICIO
Fin(demodOFDM)
```

 Algoritmo 14 demdigitalFMF

```

Paso 1      Variables:
              Matriz decimal: samples,simbolosest_rx,bit_rx,bitout
              Entero:Tm,M
Paso 2      INICIO
Paso 3      LEA(samples,Tm,M)
Paso 4      simbolosest_rx= samples
Paso 5      bit_rx=demdigital(simbolosest_rx,Tm,M)
Paso 6      bitout=bit_rx(1)... bit_rx(16)
Paso 8      retorna(bitout)
Paso 9      FIN INICIO
Fin(demdigitalFMF)
  
```

 Algoritmo 15 Función demdigital(data,Tm,M)

```

Paso 1      Variables:
              Matriz decimal: Yr
              Entero:Tm,M
Paso 2      INICIO
Paso 3      LEA(Yr,Tm,M)
Paso 4      según (Tm) {
              caso 1: datarx=demodulación psk(Yr,M)
              caso 2: datarx=demodulación qam(Yr,M)
              defecto: datarx=demodulación bpsk(Yr,M) }
Paso 5      fin (según)
Paso 6      retorna (datarx)
Paso 7      FIN INICIO
Fin(demdigital)
  
```

 Algoritmo 16 BERT

```

Paso 1      Variables:
              Matriz decimal: bitSequence,samples,datain,dataestin,
              symbols_tx,simbolosest_rx
              Decimal:xerror,numerror,BER,Q,Q_2
Paso 2      INICIO
Paso 3      LEA(bitSequence,samples,symbols_tx,simbolosest_rx)
Paso 4      datain= bitSequence
Paso 5      dataestin = samples
Paso 6      xerror=datain xor dataestin
Paso 7      numerror= suma xerror
Paso 8      BER=numerror/longitud datain
Paso 9      Q=sqrt(2)*erfcinv(2*BER);
Paso 10     Q_2=Q^2;
Paso 11     xtx= symbols_tx
Paso 12     yrx= simbolosest_rx
Paso 13     ev=xtx-yrx;
Paso 14     ev1=real(ev).^2+imag(ev).^2;
Paso 15     evr1=sum(ev1,2)/length(xtx);
Paso 16     ev2=real(xtx).^2+imag(xtx).^2;
Paso 17     evr2=sum(ev2,2)/length(xtx);
Paso 18     evm=sqrt(evr1/evr2)*100;
Paso 19     imprime(BER,Q,Q_2,evm)
Paso 20     FIN INICIO
Fin(demdigitalFMF)
  
```


7.3 ANEXO 3: CÓDIGO DE CO-SIMULACIÓN

Se presenta el código de co-simulación implementado en Matlab Rb 2009, para cada uno de los módulos del sistema de radio sobre fibra óptica.

```

%=====
%                               Modulador digital
%=====
1. OutNode{1} = InNode{2};%permite generar automaticamente las
   variables necesarias para la señal electrica
2. data=InNode{1}.Signal.bitSequence;%obtenemos los datos binarios de
   la entrada binaria
3. symbols = modemdigital(data,Tm,M);% modulamos los datos binarios
4. symbols_tx=[symbols symbols symbols symbols symbols symbols symbols
   symbols...
5. symbols symbols symbols symbols symbols symbols symbols symbols];
6. OutNode{1}.Signal.samples=symbols_tx % completamos la trama enviada
7. save('simbolostx');

%=====
%                               Modulador B-PSK M-PSK y M-QAM
%=====
%M=numero de puntos en la constelación
%Tm=tipo de modulacion: 0 BPSK 1 PSK 2 QAM
1. function [X] = modemdigital(data,Tm,M)
2. nb=log2(M);%numero de bits del simbolo
3. nc=fix(size(data,2)/nb);%numero de columnas
4. xm=reshape(data,nb,nc);%matriz [nbxnc]
5. switch Tm
6. case 1
7. %Modulacion PSK
8. dec=bi2de(xm','left-msb');
9. y = pskmod(dec,M);
10. X=y.';
11. case 2
12. %Modulacion QAM
13. dec=bi2de(xm','left-msb');
14. y = qammod(dec,M);
15. X=y.';
16. %Modulacion BPSK
17. otherwise
18. N = modem.pskmod(M);
19. mod_data = modulate(N,data);
20. X=mod_data;
21. end

```

```

=====
%
%                               Codificador STBC
%
=====
1. OutNode{1} = InNode{1};
2. OutNode{2} = InNode{1};
3. sym_rx=InNode{1}.Signal.samples;
4. sym_code=Alamouti(sym_rx,'1');
5. OutNode{1}.Signal.samples=sym_code(1,:);
6. OutNode{2}.Signal.samples=sym_code(2,:);
7. save('symSTBC');% guarda todas las variables de este archivo

=====
%
%                               Codificador Espacio Temporal de Alamouti 2X2
%
=====

1. function [modulated_coded_symbols]=Alamouti(modulated_symbols,rate)
2. modulated_coded_symbols=[];
3. if (strcmp(rate,'1')==1) % establece si la matriz esta vacia y si
4. %se enviaron los parametros de la funcion
5. if(mod(length(modulated_symbols),2)~=0) && ( nargin==2)
6. modulated_symbols(end+1:end+(2*mod(length(modulated_symbols),2)))=0;
7. end
8. symboles_reshape=reshape(modulated_symbols,2,length(modulated_symbo
9. ls)/2; %           forma matriz 2XN
10.           x1=[1 0];           %Forma matriz generadora
11.           x2=[0 1];           %| 1   0 |
12.           P1=[x1;x2];         %| 0   1 |
13.           P2=[-x2;x1];        %| 0  -1|
14.           P= [P1;conj(P2)];    %| 1   0 |
15. modulated_coded_symbols=P*symboles_reshape; % genera la
16. %matriz con los simbolos
17. modulated_coded_symbols(3:4,:)=conj(modulated_coded_symbols
18. (3:4,:)); %conjugas las dos últimas columnas
19. modulated_coded_symbols=reshape(modulated_coded_symbols,2,prod
20. (size(modulated_coded_symbols))/2); % conforma la matriz de
21. transmision
22. end
23. end

=====
%
%                               Modulador OFDM/FOFDM
%
=====

1. OutNode{1} = InNode{1};
2. sym_tx=InNode{1}.Signal.samples;
3. sym_tx2=sym_tx(1:length(sym_tx)/16);
4. xfofdm= modemFMF(sym_tx2,nFFTSsize,nBit,nBitPerSymbol,CP,tipomod);
5. OutNode{1}.Signal.samples=xfofdm;
6. save('simbolosOFDMtx');

=====
%
%                               Función Modem OFDM/FOFDM
%
=====

1. function xfofdm= modemFMF(sym_tx,nFFTSsize,nBit,...

```

```

2. nBitPerSymbol,CP,typmod)
3. if typmod==1
4. %===== para OFDM =====
5. sym_tx2=sym_tx(1:16128); % datos necesarios para 126 simbolos OFDM
6. Index=nBitPerSymbol/2;
7. subcarrierIndex = [-Index:-1 1:Index];% ejm: bit por simbolo
8. 52 [-26:-1 1:26]
9. nSymbol = ceil(length(sym_tx2)/nBitPerSymbol);% número de simbolos
10. ipMod = reshape(sym_tx2,nSymbol,nBitPerSymbol);
11. st = [];
12. %----- Genero simbolos-----
13. for ii = 1:nSymbol
14. inputiFFT = zeros(1,nFFTSize); % asignando bits a1 to a 52 to
15. subcarriers %[-26 to -1, 1 to 26]
16. inputiFFT(subcarrierIndex+nFFTSize/2+1) = ipMod(ii,:);
17. % desplazamiento subcarriers a indices [-26 to -1] a fft
18. indices de entrada [38 to 63]
19. inputiFFT = fftshift(inputiFFT);
20. outputiFFT = ifft(inputiFFT,nFFTSize);
21. outputiFFT_with_CP = [outputiFFT(length(outputiFFT)-
22. CP+1:length(outputiFFT)) outputiFFT];%prefijo cíclico
23. st = [st outputiFFT_with_CP];
24. end
25. %----- Genero trama para sincronismo-----
26. xprbs=PRBS([1 0 1 1 0 1 1],[7 6]); % generador PRBS 7 para
27. sincronismo
28. xprbs =0.5*xprbs * max(abs(st)); % mas amplitud para
29. diferenciarlos
30. xprbs2=[0 xprbs];
31. xsync=[xprbs2 xprbs2 xprbs2 xprbs2 xprbs2 xprbs2 xprbs2
32. xprbs2 xprbs2 xprbs2...
33. xprbs2 xprbs2 xprbs2 xprbs2 xprbs2 xprbs2]; % generacion de
34. la trama [0+PBRS+simbolos FOFDM] para completar y que sea
35. divisible para 8 que pide el AWG
36. xfofdm=[xsync zeros(1,2048) st];
37. else
38. %=====Para FOFDM=====
39. sym_tx2=sym_tx(1:16128); % datos necesarios para 126 simbolos
40. OFDM
41. nSymbol = ceil(length(sym_tx2)/nBitPerSymbol);% número de
42. simbolos
43. ipMod = reshape(sym_tx2,nSymbol,nBitPerSymbol);
44. st = []; % empty vector
45. %----- Genero simbolos-----
46. for ii = 1:nSymbol
47. inputiFFT = zeros(1,nFFTSize); % asignando bits a1 a a52 a
48. subcarriers [-26 to -1, 1 to 26]
49. inputiFFT(1,2:129) = ipMod(ii,:); % desplazamiento
50. indices [-26 to -1] a fft entrada indices [38 to 63]
51. outputiFFT = idct(inputiFFT);
52. outputiFFT_with_CP = [outputiFFT(length(outputiFFT)-
53. CP+1:length(outputiFFT)) outputiFFT];%prefijo cíclico

```

```

54.     st = [st outputiFFT_with_CP];
55.     end
56.     %----- Genero trama para sincronismo-----
57.     xprbs=PRBS([1 0 1 1 0 1 1],[7 6]); % generador PRBS 7 para
58.     sincronismo
59.     xprbs =0.5*xprbs * max(abs(st)); % mas amplitud para
60.     diferenciarlos
61.     xprbs2=[0 xprbs];
62.     xsync=[xprbs2 xprbs2 xprbs2 xprbs2 xprbs2 xprbs2 xprbs2
63.     xprbs2 xprbs2 xprbs2...
64.     xprbs2 xprbs2 xprbs2 xprbs2 xprbs2 xprbs2]; % generacion de
65.     la trama [0+PBRs+simbolos FOFDM] para completar y que sea
66.     divisible para 8 que pide el AWG
67.     xfofdm=[xsync zeros(1,2048) st];
68.     %-----
69.     end

%=====
%                               Modulador en cuadratura
%=====

1. OutNode{1} = InNode{1};
2. insignal=InNode{1}.Signal.samples;
3. Fs=1/InNode{1}.Signal.tStep;
4. [ outsignal ] = modcuadratura( insignal,Fc,Fs );
5. OutNode{1}.Signal.samples=outsignal;
6. save('xfofdmBP');

%=====
%                               Modulador en cuadratura (IQ)
%=====

%insignal= senal de entrada
%Fc = frecuencia de la portadora
%Fs= frecuencia de muestreo
%outsignal= senal modulada
%-----
1. function [ outsignal ] = modcuadratura( insignal,Fc,Fs )
2. L=min(size(insignal));
3. outsignal=0*insignal;
4. for n=1:L
5. outsignal(n,:)=ammod(real(insignal(n,:)),Fc,Fs,0) +
6. ammod(imag(insignal(n,:)),Fc,Fs,pi/2);
7. end

%=====
%                               Demodulador en cuadratura
%=====

1. OutNode{1} = InNode{1};

```

```

2. OutNode{2} = InNode{1};
3. insignal=InNode{1}.Signal.samples;
4. Fs=1/InNode{1}.Signal.tStep;
5. [outsignal] = demodcuadratura( insignal,Fc,Fs );
6. OutNode{1}.Signal.samples=real(outsignal);
7. OutNode{2}.Signal.samples=imag(outsignal);
8. save('xfofdmBB');

```

```

%=====
%                               Demodulador en cuadratura (IQ)
%=====
%insignal= senal de entrada
%Fc = frecuencia de la portadora
%Fs= frecuencia de muestreo
%outsignal= senal modulada
%-----
1. function [ outsignal ] = demodcuadratura( insignal,Fc,Fs )
2. L=min(size(insignal));
3. outsignal=0*insignal;
4. for n=1:L
5. outsignal(n,:)=ammod(insignal(n,:),Fc,Fs,0) +
6. li*ammod(insignal(n,:),Fc,Fs,pi/2);
7. end

```

```

%=====
%                               Demodulador OFDM/FOFDM
%=====
1. OutNode{1} = InNode{1};
2. yfofdm=InNode{1}.Signal.samples+li*InNode{2}.Signal.samples;
3. [sym_rx] = demodemFMF(yfofdm,CPrx,Nfft,Nsym,Nbitssym,tipomod2);
4. sym_rx2=[sym_rx sym_rx sym_rx sym_rx sym_rx sym_rx sym_rx sym_rx...
5. sym_rx sym_rx sym_rx sym_rx sym_rx sym_rx sym_rx sym_rx];
6. OutNode{1}.Signal.samples=sym_rx2;
7. [simbolos_rx]=sync_OFDM(data_OFDM);%sincroniza los simbolos OFDM
8. n=32;%numero de simbolos a usar para ecualizar
9. [sym_eq]=EQUALIZACION(simbolos_rx,n); %equalizacion de simbolos
10. [datarx] = demdigital(sym_eq,Tm,M);%demodulacion digital
11. OutNode{1}.Signal.samples=sym_eq;
12. save('simbolosalarx');

```

```

%=====
%                               Función Demodulador OFDM/FOFDM
%=====
1. function [sym_rx] = demodemFMF(yfofdm,CPrx,Nfft,Nsym,Nbits,typomod2)
2. if typomod2 ==1
3. %-----Para OFDM-----
4. xprbs=PRBS([1 0 1 1 0 1 1],[7 6]); % generador PRBS 7 para
5. sincronismo
6. xprbs2=[0 xprbs]; % generacion de la trama de
7. sincronizacion[0+PBRs]
8. sync1=[xprbs2 xprbs2 xprbs2 xprbs2 xprbs2 xprbs2 xprbs2 xprbs2
9. xprbs2 xprbs2...

```

```

10.     xprbs2 xprbs2 xprbs2 xprbs2 xprbs2 xprbs2];
11.     yfofdm_rx = yfofdm((2*length(sync1))+1:length(yfofdm));
12.     % elimino la PRBS
13.     yfofdm_cp=reshape(yfofdm_rx,CPrx+Nfft,Nsym-2);% coloco en
14.     columnas los simbolos con el CP arriba
15.     yfofdm_sym=yfofdm_cp(CPrx+1:CPrx+Nfft,:);% elijo solo los
16.     simbolos OFDM
17.     yfofdm_sym_rx=fft(yfofdm_sym);% obtengo los simbolos
18.     recibidos
19.     sym_rx_des=[yfofdm_sym_rx(Nfft-Nbits/2+1:Nfft,:);
20.     yfofdm_sym_rx(2:Nbits/2+1,:)];
21.     sym_rx_des=sym_rx_des.';
22.     sym_rx=reshape(sym_rx_des,1,(Nsym-2)*Nbits);
23.     sym_rx=[sym_rx sym_rx(1:256)];
24.     else
25.     %-----Para FOFDM-----
26.     xprbs=PRBS([1 0 1 1 0 1 1],[7 6]); % generador PRBS 7 para
27.     sincronismo
28.     xprbs2=[0 xprbs]; % generacion de la trama de
29.     sincronizacion[0+PBRs]
30.     sync1=[xprbs2 xprbs2 xprbs2 xprbs2 xprbs2 xprbs2 xprbs2
31.     xprbs2 xprbs2 xprbs2...
32.     xprbs2 xprbs2 xprbs2 xprbs2 xprbs2 xprbs2];
33.     yfofdm_rx = yfofdm((2*length(sync1))+1:length(yfofdm));
34.     % elimino la PRBS
35.     yfofdm_cp=reshape(yfofdm_rx,CPrx+Nfft,Nsym-2);% coloco con el
36.     CP arriba
37.     yfofdm_sym=yfofdm_cp(CPrx+1:CPrx+Nfft,:);% elijo solo los
38.     simbolos OFDM
39.     yfofdm_sym_rx=dct(yfofdm_sym);% obtengo los simbolos
40.     recibidos
41.     yfofdm_sym_rx=yfofdm_sym_rx(2:129,:);
42.     sym_rx_des=yfofdm_sym_rx.';
43.     sym_rx=reshape(sym_rx_des,1,(Nsym-2)*Nbits);
44.     sym_rx=[sym_rx sym_rx(1:256)];
45.     end

%=====
%                               Decodificador STBC
%=====
1. OutNode{1} = InNode{1};
2. symstbcm1rx=InNode{1}.Signal.samples;
3. symstbcm2rx=InNode{2}.Signal.samples;
4. symstbc=[symstbcm1rx(1:16128);symstbcm2rx(1:16128)];% simbolos
5. recibidos
6. load('channel_FMF_ruido');
7. h=hest;% canal estimado
8. sym1=symstbc(:,1:2:length(symstbc));
9. sym2=symstbc(:,2:2:length(symstbc));
10.     Y=[sym1;conj(sym2)];
11.     h1=[conj(h(1,2)) -1*conj(h(1,1));conj(h(2,2))
12.     -1*conj(h(2,1))];
13.     H=[h;h1];

```

```

14.     xest=pinv(H)*Y;
15.     symest=reshape(xest,1,16128);
16.     %----- ecualizacion del canal-----
17.     load ('simbolostx')
18.     load ('simbolosstbcrx')
19.     simtx=symbols(1:16128);
20.     Heq=symest./symbols(1:16128);
21.     Heq2=smooth(1./Heq);
22.     symeq=Heq2.*symest.';
23.     symeq=symeq.';
24.     symest2=[symeq symeq(1:256)];
25.     symestout=[symest2 symest2 symest2 symest2 symest2 symest2
26.     symest2...
27.     symest2 symest2 symest2 symest2 symest2 symest2 symest2
28.     symest2 symest2]; %completamos la trama
29.     OutNode{1}.Signal.samples=symestout;
30.     save ('simbolosstbcrx');

%=====
%                               Demodulador digital
%=====

1. OutNode{1} = InNode{1};
2. simbolosest_rx=InNode{1}.Signal.samples;
3. bit_rx = demdigital(simbolosest_rx(1:16128),Tm,M);
4. bit_rx2=[bit_rx bit_rx(1:256)];
5. bitout=[bit_rx2 bit_rx2 bit_rx2 bit_rx2 bit_rx2 bit_rx2 bit_rx2...
6. bit_rx2 bit_rx2 bit_rx2 bit_rx2 bit_rx2 bit_rx2 bit_rx2 bit_rx2
7. bit_rx2]; %completamos la trama
8. OutNode{1}.Signal.samples=double(bitout);
9. save ('datosest');

%=====
%                               Demodulador Digital B-PSK  M-PSK  M-QAM
%=====

1. function [datarx] = demdigital(Yr,Tm,M)
2. switch Tm
3. case 1
4. %demodulacion PSK
5. dem_data= pskdemod(Yr,M);%obtenemos los simbolos
6. bin=de2bi(dem_data','left-msb');%obtemenos los bits de cada simbolo
7. dataTrx=bin';%transpuesta obtenemos los bits en cada columna
8. datarx=reshape(dataTrx,1,size(dataTrx,1)*size(dataTrx,2));%ordeno
9. %demodulacion OOK
10.     case 2
11.     %demodulacion QAM
12.     dem_data= qamdemod(Yr,M);%obtenemos los simbolos
13.     bin=de2bi(dem_data','left-msb');%obtemenos los bits de cada
14.     simbolo
15.     dataTrx=bin';%transpuesta obtenemos los bits en cada columna
16.     datarx=reshape(dataTrx,1,size(dataTrx,1)*size(dataTrx,2));
17.     %ordeno

```

```

18.     otherwise% para BPSK
19.     datarx = real(Yr)>0; % receptor - hard decision decoding
20.     end

```

```

=====
%
%                               BERT
%
=====

```

```

1. OutNode{1} = InNode{2};
2. datain=InNode{1}.Signal.bitSequence;
3. dataestin=InNode{2}.Signal.samples;
4. xin=datain(1:16128);
5. yrx=dataestin(1:16128);
6. xerror=xor(logical(xin),logical(yrx)); % calculo del numero de
   errores
7. numerror=sum(xerror,2);                % sumo los errores
8. BER=numerror/16128;
9. %----- Q^2-----
10.    Q=sqrt(2)*erfcinv(2*BER);
11.    Q_2=Q^2;
12.    %----- EVM-----
13.    load ('datosest')
14.    load ('simbolostx')
15.    xtx=symbols_tx(1:16128);
16.    yrx=simbolosest_rx(1:16128);
17.    ev=xtx-yrx;
18.    ev1=real(ev).^2+imag(ev).^2;
19.    evr1=sum(ev1,2)/length(xtx);
20.    ev2=real(xtx).^2+imag(xtx).^2;
21.    evr2=sum(ev2,2)/length(xtx);
22.    evm=sqrt(evr1/evr2)*100;
23.    %----- archivo de BERT-----
24.    texto=fopen('errores16QAMFOFDM.txt','a');
25.    fprintf(texto,'\n%d',BER);
26.    fprintf(texto,'\t%d',Q);
27.    fprintf(texto,'\t%d',Q_2);
28.    fprintf(texto,'\n%d',evm);
29.    fclose(texto)
30.    OutNode{1}.Signal.samples=[numerror zeros(1:262143)];
31.    save('BERTerrores');

```

```

=====
%
%                               Fibra óptica de pocos modos CNLSE
%
=====

```

```

1. OutNode{1} = InNode{1};
2. OutNode{2} = InNode{2};
3. %inOFDM=[InNode{1}.Signal.samples;InNode{2}.Signal.samples];
4. %Fs=1/InNode{1}.Signal.tStep;
5. %[ outsignal ] = modcuadratura( insignal,Fc,Fs );

```



```

6. %OutNode{1}.Signal.samples=outsignal;
7. %save('FibraSignal');
8. %load FibraSignal.mat;
9. %-----
10. %GENERADOR DE PULSOS GAUSSIANOS BITS
11. %-----
12. R=10e9; %velocidad de transmision [bps]
13. n=1; %numero de bits
14. Fs=1/6.25e-12; %Frecuencia de muestreo
15. Po=1; %Potencia en [mW]
16. Ch=0;
17. m=1;
18. [u0,tu0,tu0p,du0t] = genpulsosgauss(R,n,Fs,Po,Ch,m); %pulsos
19. gaussianos para el modo 1
20. [u1,tu1,tulp,dult] = genpulsosgauss(R,n,Fs,Po,Ch,m); %pulsos
21. gaussianos para el modo 1
22. at1=u0';
23. at2=u1';
24. %=====
25. % FIBRA OPTICA TWO MODE FIBER
26. %=====
27. % PARAMETRO DE LA FIBRA OPTICA
28. c = 300000; %velocidad de a luz[Km/sec]
29. lamda0 = 1550; %frecuencia de portadora optica [nm]
30. %L=25; %longitud de la fibra [Km]
31. %dz=0.5; %tamano del paso [Km]
32. %-----modo 1-----
33. %alphaDBm1 =0; %perdidas en [dB/km]
34. alpha1 = alphaDBm1/(10*log10(exp(1))); %perdidas en [1/Km]
35. %Dm1=22; %Dispersion modo 2 [ps/(nm.km)]
36. %beta1m1=0; %DMGD[ps/Km] delta de beta 1 del modo 1
37. beta2m1=-1*(lamda0^2*Dm1)/(2*pi*c); %[ps^2/Km]
38. %-----modo 2-----
39. %alphaDBm2 =0; %perdidas en [dB/km]
40. alpha2 = alphaDBm2/(10*log10(exp(1))); %perdidas en [1/m]
41. %Dm2=17; %Dispersion modo 2 [ps/(nm.km)]
42. %beta1m2=0;%2.1; %DMGD[ps/Km] delta de beta1 del modo 2
43. si > 50 comportamiento cuasi lineal
44. beta2m2=-1*(lamda0^2*Dm2)/(2*pi*c); %[ps^2/km]
45. %---- coeficientes no lineales entre los modos m1 y m2-----
46. %gamma11=0; %[1/w-km]
47. %gamma12=0.0002; %[1/w-km]
48. %gamma21=0.0002; %[1/w-km]
49. %gamma22=0; %[1/w-km]
50. %CALCULANDO CANTIDADES
51. nz=L/dz; %numero de pasos
52. beta1=[beta1m1 beta2m1]';
53. beta2=[beta1m2 beta2m2]';
54. %LDm1=To^2/abs(beta2m1); % Distancia de dispersion del modo 1
55. %LDm2=To^2/abs(beta2m1); % Distancia de dispersion del modo 2
56. gamma=[gamma11 gamma12;gamma21 gamma22];
57. %=====

```



```

110. %-----
111. fprintf(1, '\nSimulación finalizada....');
112. fprintf(1, '\n-----\n');
113. %----- señal pasa-----
114. load channel_FMF.mat; % carga el canal estimado de FMF
115. inOFDM=[InNode{1}.Signal.Ex;InNode{2}.Signal.Ex];
116. received_signal=hestFMF*inOFDM; % pasa los simbolos por
117. el canal
118. %pw=sum(inOFDM.^2,2);
119. %snr=80*(pw(1,1)/2+0.13); % Generando ruido aleatorio de
120. disparo
121. snr=100;
122. noise_variance=1/(10^(snr/10));
123. ruido=(sqrt(noise_variance/2))*(randn(2,size(inOFDM,2))+...
124. i*randn(2,size(inOFDM,2)));
125. received_signal=received_signal+ruido; % anadiendo ruido a
126. la señal
127. hest=received_signal*pinv(inOFDM); % estimacion del canal
128. con ruido LS
129. save('channel_FMF_ruido.mat','hest') %guardo el canal
130. estimado
131. outOFDM=pinv(hest)*received_signal; % estimacion de los
132. simbolos con ZF
133. OutNode{1}.Signal.Ex=outOFDM(1,:);
134. OutNode{1}.Signal.Ex=outOFDM(2,:);
135. save('canal_FMF') ;

```

```

%=====
% Resuelve la CNLSE para dos modos de propagacion en Few Mode Fiber
%=====

```

```

1. function [ulm1,ulm2] = CNLSE2m(u0m1,u0m2,dt,dz,nz,alpham1,...
2. alpham2,betapm1,betapm2,gamma)
3. nt = length(u0m1); % numero de puntos de FFT
4. w = 2*pi*(-nt/2:(nt/2-1))/(dt*nt); % calculo de frecuencias
5. w = w';
6. fm1=fft(u0m1);
7. ufftm1 = fftshift(fm1); % campo1 en el dominio de la frecuencia
8. fm2=fft(u0m2);
9. ufftm2 = fftshift(fm2); % campo2 en el dominio de la frecuencia
10. fiberlength = nz*dz; % longitud de la fibra a simular [m]
11. propagedlength =0; % inicializacion de la propagacion
12. %-----Simulacion de la propagacion-----
13. fprintf(1, '\nCorriendo simulación... ');

14. %-----operador lineal del modo 1-----
-----
15. operadorlinealm1 = -alpham1/2 - 1i*betapm1(1)*w +...
16. 1i*betapm1(2)*(w).^2/2;
17. %-----operador lineal del modo 2-----
18. operadorlinealm2 = -alpham2/2 - 1i*betapm2(1)*w +...

```

```

19.     li*betapm2(2)*(w).^2/2;
20.     while propagedlength < fiberlength,
21.         %-----propagacion de la parte lineal hasta dz-----
22.         halfstepx = exp(operadorlinealm1*dz);
23.         A1 = ifft(ufftm1.*halfstepx);
24.         halfstepy = exp(operadorlinealm2*dz);
25.         A2 = ifft(ufftm2.*halfstepy);
26.         %-----propagacion de la parte no lineal hasta dz-----
27.         M11=((gamma(1,1)*(A1.*conj(A1)))+(gamma(1,2)*(A2...
28.             .*conj(A2))))).*A1;
29.         M12= 1i*(2*((real(A1).*imag(A2))-(imag(A1).*real(A2)))...
30.             *- 1i.*A2)*(gamma(1,2)/3);
31.         M21= 1i*(2*((real(A2).*imag(A1))-(imag(A2).*real(A1)))...
32.             *-1i.*A1)*(gamma(2,1)/3);
33.         %M12=-1*M21;
34.         M22=((gamma(2,1)*(A1.*conj(A1)))+(gamma(2,2)*(A2...
35.             .*conj(A2))))).*A2;
36.         At1=[];
37.         At2=[];
38.         for ii=0:length(A1)-1
39.             M=[M11(ii+1) M12(ii+1);M21(ii+1) M22(ii+1)];
40.             A=[A1(ii+1);A2(ii+1)];
41.             At=expm(M.*dz)*A;
42.             At1=[At1 At(1)];
43.             At2=[At2 At(2)];
44.         end
45.         ufftm1 = fft(At1');
46.         ufftm2 = fft(At2');
47.         % ufftm1 = fft(A1); %activar solo para ver parte lineal
48.         %ufftm2 = fft(A2); %activar solo para ver parte lineal
49.         propagedlength = propagedlength + dz;
50.         fprintf(1, '\b\b\b\b\b\b\b%5.1f%%', propagedlength...
51.             * 100.0 /fiberlength );
52.     end
53.     ulm1 = At1';
54.     ulm2 = At2';
55.     %ulm1 = A1; %activar solo para ver parte lineal
56.     %ulm2 = A2; %activar solo para ver parte lineal

```