



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

ANÁLISIS COMPARATIVO DEL DESEMPEÑO DE RECEPTORES ÓPTICOS COHERENTES Y NO COHERENTES PARA GFDM EN REDES PON

JOHANNA BERENICE ARGUERO TELLO

Trabajo de Titulación, modalidad: Proyectos de Investigación y Desarrollo, presentado ante el Instituto de Posgrado y Educación Continua de la ESPOCH, como requisito parcial para la obtención del grado de:

MAGISTER EN INTERCONECTIVIDAD DE REDES

Riobamba - Ecuador
Agosto 2018

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

CERTIFICACIÓN:

EL TRIBUNAL DEL TRABAJO DE TITULACIÓN CERTIFICA QUE:

El Trabajo de Titulación modalidad Proyectos de Investigación y Desarrollo, titulado: **“ANÁLISIS COMPARATIVO DEL DESEMPEÑO DE RECEPTORES ÓPTICOS COHERENTES Y NO COHERENTES PARA GFDM EN REDES PON”**, de responsabilidad de Ing. Johanna Berenice Arguero Tello, ha sido minuciosamente revisado y se autoriza su presentación.

Tribunal:

Ing. Oswaldo Martínez Guashima; M.Sc.

PRESIDENTE

Ing. Germán Arévalo Bermeo; PhD.

DIRECTOR DE TESIS

Ing. Jorge López Logacho; M.Sc.

MIEMBRO DEL TRIBUNAL

Ing. Blanca Hidalgo Ponce; M.Sc.

MIEMBRO DEL TRIBUNAL

Riobamba, agosto 2018

DERECHOS INTELECTUALES

Yo, Johanna Berenice Arguero Tello soy responsable de las ideas, doctrinas y resultados expuestos en el Trabajo de Titulación modalidad Proyectos de Investigación y Desarrollo, y que el patrimonio intelectual generado por la misma pertenece exclusivamente a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Johanna Berenice Arguero Tello
No. Cédula: 1723989149

©2018, Johanna Berenice Arguero Tello

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

DEDICATORIA

La familia es una pieza clave de la vida, nos empujan día a día a superarnos, nos dan raíces fuertes y extensas alas. Para mis padres, mis hermanos, mi esposo y mis abuelitos.

Berenice

AGRADECIMIENTOS

Muchas personas han contribuido indirecta o directamente en este estudio, agradecer por sus valiosos comentarios, opiniones e interesantes debates sobre este tema de investigación y por despertar mi interés en la investigación.

Agradecimientos a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Reconocer el incansable apoyo de mi familia.

CONTENIDO

RESUMEN	xii
SUMMARY	xiii
CAPÍTULO I	
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Planteamiento del problema	2
<i>1.1.1 Formulación del problema</i>	3
<i>1.1.2 Justificación de la investigación</i>	3
1.2 Objetivos	4
<i>1.2.1 Objetivo general</i>	4
<i>1.2.2 Objetivos específicos</i>	4
1.3 Hipótesis	4
CAPÍTULO II	
2. MARCO TEÓRICO	5
2.1 Red móvil 5G	5
2.2 Diseño de la forma de onda	7
2.3 Red óptica pasiva (Passive Optical Network -PON)	10
2.4 Receptor óptico directo o no-coherente	12
2.5 Receptor óptico coherente	13
2.6 Capacidad de los sistemas ópticos	16
CAPÍTULO III	
3. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	19
3.1 Diseño de la investigación	19
<i>3.1.1 Métodos de investigación</i>	19
<i>3.1.2 Enfoque de la investigación</i>	20

3.1.3	<i>Alcance de la investigación</i>	20
3.1.4	<i>Operacionalización de variables</i>	20
3.1.5	<i>Matriz de consistencia</i>	21
3.1.6	<i>Unidad de análisis</i>	22
3.1.7	<i>Población de estudio</i>	22
3.1.8	<i>Recolección datos</i>	23
3.1.9	<i>Análisis de datos</i>	23
3.1.10	<i>Validación de la norma UIT G948.2</i>	23
3.2	Metodología de implementación del sistema de comunicación	24
3.2.1	<i>Modelo numérico de la señal GFDM</i>	24
3.2.2	<i>Modelo del sistema óptico</i>	28
3.2.3	<i>Comparación del modelo de detección directa y detección coherente</i>	30
CAPÍTULO IV		
4.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	33
4.1	Comparación entre detección directa y detección coherente	39
4.2	Comprobación de Hipótesis	42
CAPITULO V		
5.	PROPUESTA DE INVESTIGACION INTRODUCCIÓN	46
5.1	Título de la Propuesta	46
5.2	Antecedentes de la Propuesta	46
5.3	Objetivos	47
5.3.1	<i>General</i>	47
5.3.2	<i>Específicos</i>	47
5.4	Justificación	48
5.5	Propuesta	48
5.5.1	<i>Modelo del sistema óptico propuesto</i>	48
5.5.2	<i>Tipo de fibra</i>	49

5.5.3	<i>Longitud de Onda</i>	49
5.5.4	<i>Especificación de la OLT</i>	50
5.5.5	<i>Especificación de la ONU</i>	50
	CONCLUSIONES	51
	RECOMENDACIONES	53
	BIBLIOGRAFÍA	
	ANEXOS	

INDICE DE TABLAS

Tabla 1-2 Comparación entre las formas de onda para 5G	8
Tabla 1-3 Conceptualización de las variables	21
Tabla 2-3 Operacionalización de variables	21
Tabla 3-3 Matriz de consistencia	22
Tabla 4-3 Parámetros de la norma UIT- G.984.2.....	24
Tabla 5-3 Parámetros de simulación de la señal GFDM.....	26
Tabla 6-3 Parámetros de configuración del fotodiodo PIN.....	30
Tabla 1-4 Comparación numérica de los detectores ópticos	42
Tabla 2-4 Valor de la sensibilidad (en dBm) requerida en el receptor no-coherente para un BER= 10^{-3}	43
Tabla 3-4 Valor de la sensibilidad (en dBm) requerida en el receptor coherente para un BER= 10^{-3}	43
Tabla 4-4 Tabla de frecuencias observadas para un valor de referencia de un BER= 10^{-3}	44
Tabla 5-4 Tabla de frecuencias estimadas para un valor de referencia de un BER= 10^{-3}	44
Tabla 6-4 Comparación de la sensibilidad del receptor experimental con la norma UIT G.948.2 ..	45
Tabla 1-5 Especificaciones de la OLT y ONU.....	50

INDICE DE FIGURAS

Figura 1-2 Fronthaul móvil.....	6
Figura 2-2 Arquitectura C-RAN 5G	6
Figura 3-2 Modulador GFDM.....	9
Figura 4-2 Red óptica pasiva (PON).....	11
Figura 5-2 Esquema de detección directa	12
Figura 6-2 Esquema de detección directa	13
Figura 7-2 Híbrido 90°	14
Figura 1-3 Señal GFDM en tiempo-con PRBS para sincronización.....	26
Figura 2-3 Espectro de la señal GFDM	27
Figura 3-3 Diagrama de constelación 4-QAM (a) símbolos sin ecualizar, (b) los símbolos ecualizados.	28
Figura 4-3 Sistema de transmisión óptico PON.....	29
Figura 5-3 Espectro óptico de la señal GFDM	29
Figura 6-3 Diagrama de bloques del modelo de detección directa	31
Figura 7-3 Diagrama de bloques del modelo de detección coherente.....	32
Figura 1-4 BER versus la potencia de recepción (Prx) para una transmisión sobre 20Km de fibra óptica con (a) modulación 4QAM y (b) modulación 16QAM.....	34
Figura 2-4 EVM [%] versus la potencia de recepción (Prx). (a) Modulación 4QAM, (b) modulación 16QAM.	36
Figura 3-4 BER versus la potencia de recepción (Prx). (a) Modulación 4QAM, (b) modulación 16QAM.	37
Figura 4-4 EVM [%] versus la potencia de recepción empleado la detección coherente. (a) Modulación 4QAM (b) modulación 16QAM	39
Figura 5-4 (a) BER versus Potencia de recepción. (b) EVM versus Potencia de recepción.....	40
Figura 6-4 BER versus Potencia de recepción (a), EVM versus Potencia de recepción (b).....	41
Figura 1-5 Arquitectura del sistema de transmisión óptica.....	49

RESUMEN

El objetivo fue analizar el desempeño de una transmisión GFDM utilizando receptores ópticos coherentes y no-coherentes, para lo cual se realizó una transmisión de una señal de radio frecuencia sobre fibra usando la señal GFDM sobre una red óptica pasiva (PON) a 10 Gb/s por medio de una co-simulación OptSim –Matlab. La necesidad de mejorar el rendimiento de las futuras redes 5G implicará que el enlace de fronthaul sea un enlace de alta velocidad implementado sobre fibra óptica, para garantizar los requerimientos de la nueva generación de la red móvil. Con el fin de satisfacer tasas de datos de usuario superiores a 10 Gb/s, con una latencia menor a 1ms, uno de los candidatos principales es el esquema multiportadora GFDM como forma de onda para 5G. El desafío es aumentar la capacidad del enlace fronthaul el cual depende de la combinación de: el tipo de detección óptica que se emplee, los formatos de modulación y post-procesamiento digital de la señal. Además, una buena opción para el esquema de transmisión a ser empleado es la transmisión coherente, dado que esta aumenta sustancialmente la capacidad del rendimiento de una red óptica a comparación de los esquemas basados en modulación de intensidad con detección directa. Los resultados obtenidos demuestran una mejora apreciable en la sensibilidad del receptor (alrededor de 3 dB) empleando un detector coherente. Dentro de esta perspectiva se avizora que la detección coherente permitirá incrementar la capacidad de las redes ópticas fronthaul. Sin embargo, una desventaja importante de la transmisión coherente es su alto costo de implementación. Adicionalmente se podría realizar estudios de pre-compensación y post-compensación de la dispersión introducida en la señal por la propagación de la misma en la fibra óptica.

Palabras clave: <TECNOLOGÍAS Y CIENCIAS DE LA INGENIERÍA>, <TELECOMUNICACIONES>, <REDES DE COMUNICACIÓN>, <SISTEMAS MOVILES CELULARES>, <COMUNICACIONES ÓPTICAS>, <RECEPTORES OPTICOS COHERENTES Y NO COHERENTES>

ABSTRACT

The objective was to analyse the performance of GFDM transmission using coherent and noncoherent optical receivers, for which a transmission of a radio frequency signal over fiber was made using GFDM signal on a passive optical network (PON) at 10 Gb/s through an OptSim-Matlab co-simulation. The need to improve the performance of future 5G networks will mean that the fronthaul will be a high-speed link implemented over an optical fiber, to guarantee the requirements of the new generation mobile network.

In order to satisfy user data rates higher than 10 Gb/s, with a latency less than 1 ms, one of the main candidates is the GFDM multi-carrier scheme as a 5G waveform. The challenge is to increase the fronthaul link capacity which depends on the combination of: the type of optical detection that is used, the modulation formats and digital post-processing of the signal. In addition, a good option for the transmission scheme to be used is the coherent transmission, because this substantially increases the performance capacity of an optical network compared to schemes based on intensity modulation and direct detection. The results obtained show an appreciable improvement in the receiver sensitivity (around 3 dB) using a coherent detector. Within this perspective it is envisioned that the coherent detection will allow to increase the capacity of the fronthaul optical networks. However, an important disadvantage of the coherent transmission is its high implementation cost. Additionally, dispersion pre-compensation and post-compensation studies could be carried out introduced in the signal by the propagation of its in the optical fiber.

Key words: <TECHNOLOGIES AND ENGINEERING SCIENCES>, <TELECOMMUNICATIONS>, <COMMUNICATION NETWORKS>, <MOBILE PHONES SYSTEMS>, <OPTICAL COMMUNICATIONS>, <COHERENT AND NONCOHERENT OPTICAL RECEIVERS>

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

La tendencia a requerir altas velocidades de transmisión de datos por parte del usuario hoy en día y principalmente en el futuro es un reto para los operadores y proveedores de servicios. Con la red 5G las necesidades del rendimiento son una pieza fundamental ya que esta red tiene desafiantes escenarios de movilidad, capacidad para un número masivo de usuarios, un contexto atractivo para aplicaciones futuristas, es decir es una red diseñada para soportar alta tasa de datos, de ahí que la arquitectura móvil ha dado un giro e incluye tecnologías ópticas en sus redes de acceso, para garantizar un gran ancho de banda, baja latencia y poco tiempo de sincronización (Fifth Generation Forum, 2016).

Sin duda alguna, el incremento de la demanda de uso de las redes pasivas de acceso óptico (PON, Passive Optical Networks) que principalmente se basan en la detección directa, ha exigido en los últimos años el desarrollo de nuevas técnicas y esquemas de transmisión con el fin de aumentar la capacidad de este tipo de redes, como lo evidencia el reciente lanzamiento del nuevo estándar NG-PON2. No obstante, el uso de detectores coherentes se ha utilizado desde hace varios años en redes de larga distancia para mejorar el rendimiento y existen muchas propuestas para el uso de esta tecnología en PON (Rohde, Gottwald, Teixeira, & Wey, 2014) .

Por lo tanto, se propone el uso de la tecnología PON en el enlace fronthaul de la red móvil 5G, con dos esquemas de transmisión óptica: Modulación de Intensidad con Detección Directa (IM-DD) y Transmisión-Detección Coherente. En el receptor óptico se empleó un detector no-coherente para realizar la transmisión de la señal de radio frecuencia usando multiplexación por división de frecuencia generalizada (GFDM, Generalized Frequency Division Multiplexing) para el primer esquema. Mientras que para el segundo esquema se empleó un detector coherente homodino para la detección de la señal GFDM. Los esquemas propuestos fueron demostrados experimentalmente mediante una co-simulación entre OptSim y Matlab. Logrando la transmisión de la señal GFDM con formatos de modulación 4QAM y 16QAM, sobre 20 Km de fibra monomodo a 10 Gb/s (International Telecommunication Union, 2015).

En este trabajo se compara la sensibilidad del receptor al emplear un esquema de detección coherente versus una detección directa o no-coherente, y determinar mediante la tasa de bits errados (BER) y el vector de magnitud de error (EVM) el desempeño de la red. En el capítulo I se detalla el problema de investigación, el planteamiento del problema.

En el capítulo II se describen los aspectos teóricos de la detección directa y la detección coherente en enlaces ópticos, así como los detalles de la forma de onda GFDM y de una red 5G. En la sección III se determina la arquitectura del sistema, donde se ejecuta los dos escenarios de co-simulación de transmisión de radio frecuencia sobre fibra óptica en una red PON, tanto para transmisión IM-DD como para transmisión coherente.

En la sección IV se analiza los resultados obtenido en la co-simulación. Finalmente se presentan las conclusiones del trabajo de investigación realizado.

1.1 Planteamiento del problema

El rápido incremento del tráfico de datos global, debido al significativo aumento de dispositivos móviles y servicios tiene una tasa de crecimiento del 22% anual desde el 2015 e indican que esta cifra incrementará cerca de tres veces en los próximos 5 años (CISCO, 2016), de manera que existirá un aumento en número de dispositivos por lo cual se requiere expandir la capacidad de la red móvil, lo que se conseguirá a través del desarrollo de la nueva tecnología 5G, que tiene como objetivo proporcionar velocidades de datos de 10 a 100 veces más rápidas y capacidad 1000 veces mayor con baja latencia y bajo consumo de energía (Fifth Generation Forum, 2016, pág. 65).

La tendencia al futuro de las redes móviles es la inserción de redes PON en el segmento de acceso fronthaul, para garantizar el ancho de banda, la baja latencia y tiempo de sincronización para las nuevas tecnologías móviles.

Para lograr alcanzar altas tasas de transmisión en sistemas en los que convergen las redes ópticas y las inalámbricas se involucran dos aspectos: la técnica de recepción óptica que puede ser coherente o no-coherente y, los formatos de modulación avanzada de amplitud/fase, que pueden incrementar la velocidad de transmisión y mitigar las dispersiones dadas por la no-linealidad de la fibra en el transporte de la señal. Para el efecto, la tecnología inalámbrica 5G propone el uso GFDM como técnica de modulación multiportadora ya que logra un mejor rendimiento espectral que la multiplexación por división de frecuencia ortogonal (OFDM, Orthogonal Frequency Division Multiplexing) con una tasa de error por paquete bajo (Doufexi & Nix, 2016).

1.1.1 Formulación del problema

Establecer valores de potencia óptica y de radio frecuencia que permitan cumplir con el estándar para redes PON y un EVM adecuado para la transmisión de GFDM, utilizando receptores ópticos coherentes y no coherentes y determinar si existe una diferencia significativa entre la sensibilidad de estos tipos de receptores.

1.1.2 Justificación de la investigación

El incremento cada vez mayor de la velocidad de transmisión de las nuevas aplicaciones como video de alta definición, video por streaming, juegos en línea, entre otros, hace que las técnicas actualmente implementadas en las redes de acceso no consigan satisfacer estos requerimientos, por lo cual la tendencia es encontrar métodos nuevos para incrementar el ancho de banda de los sistemas de transmisión de datos haciendo uso de técnicas de modulación avanzada por amplitud y fase, mejorando la eficiencia la espectral (a más de 1bit/símbolo), y haciendo uso de técnicas multiportadoras más eficientes espectralmente como lo es GFDM. La combinación de estas técnicas en un sistema de transmisión por fibra óptica constituye el candidato idóneo para superar los principales problemas de banda ancha para los futuros sistemas 5G (Doufexi & Nix, 2016, pág. 335).

Por otra parte, el alcance de los sistemas inalámbricos es reducido por lo que el empleo de la fibra óptica se hace necesario debido a su baja atenuación. Además, un sistema de transmisión coherente compensa la degradación de la señal producida por la dispersión y la no-linealidad de la fibra, convirtiéndolo en un sistema óptico robusto ya que mejora la sensibilidad del receptor. Sin embargo, al requerir más componentes ópticos es una opción costosa, por lo que se prefiere sistemas de detección no coherente que reducen ostensiblemente su costo, pero que tienen una menor sensibilidad del receptor (Torrengo, 2011).

El propósito de esta investigación es encontrar valores adecuados de funcionamiento de GFDM en una red óptica con receptores coherentes y no coherentes en redes PON para la nueva generación de tecnología inalámbrica 5G contribuyendo a mejorar los servicios y aplicaciones como IoT, video streaming de alta velocidad y realidad aumentada. Y propone evaluar el desempeño de GFDM como esquema de modulación multiportadora en un sistema de comunicación óptica de acceso con receptores ópticos coherentes y no-coherentes en redes PON.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Analizar el desempeño de una transmisión GFDM utilizando receptores ópticos coherentes y no-coherentes.

1.2.2 Objetivos específicos

- Implementar un sistema de transmisión de GFDM en redes PON con detección no-coherente mediante simulación numérica.
- Implementar un sistema de transmisión de GFDM en redes PON con detección coherente mediante simulación numérica.
- Analizar el desempeño de la transmisión GFDM en una red PON con detección coherentes y no-coherentes respecto al EVM y la potencia de entrada de radio frecuencia.

1.3 Hipótesis

Hipótesis investigación (Hi): Habrá diferencia significativa entre la sensibilidad del receptor no-coherente y la sensibilidad del receptor coherente al transmitir la señal GFDM sobre 20 km de fibra a 10Gb/s.

Hipótesis nula (Ho): No habrá diferencia significativa entre la sensibilidad del receptor no-coherente y la sensibilidad del receptor coherente al transmitir la señal GFDM sobre 20 km de fibra a 10Gb/s.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se presenta el estado del arte sobre el incremento del rendimiento de las redes de acceso basadas en redes ópticas pasivas (PON) con el fin de ser utilizadas como redes de fronthauling para 5G. Además, se da a conocer las nuevas técnicas y esquemas de transmisión con el fin de aumentar la capacidad de este tipo de redes.

2.1 Red móvil 5G

La red 5G está diseñada para soportar altas tasas de datos de usuario, mayor cobertura y desafiantes escenarios de movilidad. Se caracteriza por una alta capacidad, baja latencia y un bajo consumo de energía. En cuanto a la velocidad de transmisión de datos, para áreas interiores es de 10 Gb/s y para usuarios de baja movilidad es de un 1 Gb/s (Anritsu Corporation, 2017, pág. 3).

Frente a este escenario, 5G es atractivo para la automoción, internet de las cosas (IoT- Internet of Things) y aplicaciones futuristas, donde la fiabilidad y la latencia juegan un papel importante para los diferentes servicios como: streaming de video, tele-presencia 3D, aplicaciones interactivas, servicio de almacenamiento en la nube, servicios emergentes críticos, servicios en tiempo real y de realidad virtual. Conviene especificar que para este tipo de aplicaciones requiere velocidades en el orden de 10 Gb/s (Anritsu Corporation, 2017, págs. 14-19). De ahí que la interfaz de radio 5G traerá un aumento significativo en los requerimientos de la capacidad de tráfico en la red de transporte.

La arquitectura de la red móvil es un factor que determina la capacidad de la red de transporte (Fiorani, Tombaz, S, Martensson, & Monti, 2016) ya que mejoraría la transmisión en el fronthaul móvil. Siendo este el enlace entre la unidad de banda base (BBU-Base Band Unit) y la cabecera de radio remoto (RRH- Remote Radio Header) dentro de la arquitectura de transporte de la red móvil como se observa en la figura 1-2.

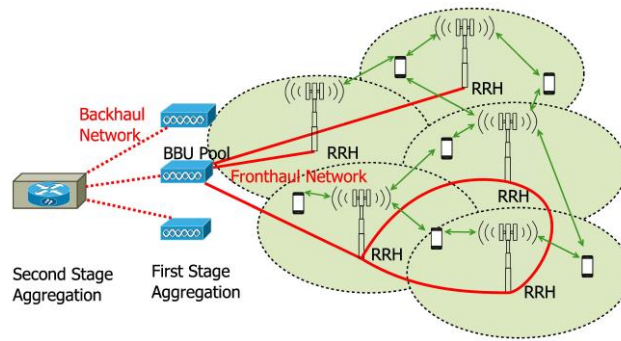


Figura 1-2 Fronthaul móvil

Fuente: (Ranaweera, Wong, & Nirmalathas, 2017)

La red de acceso de radio distribuida (Distributed-RAN) incorpora la BBU y la RRH dentro de la estación base (BS-Base Station) de la red móvil. Puesto que cada BS cumple con las funciones de radio y las funciones de banda base. Por el contrario, en la red de acceso de radio centralizada (C-RAN) las funciones de la banda base se encuentran centralizadas y se conectan a distintas RRHs donde las funciones de radio se fijan en las RRH ubicadas en la BS, como se observa en la figura 2-2. A diferencia de la arquitectura Cloud-RAN, la BBU está virtualizada en la nube y se puede comunicar con cualquier RRH a través de una red de conmutación (Browning, 2017).

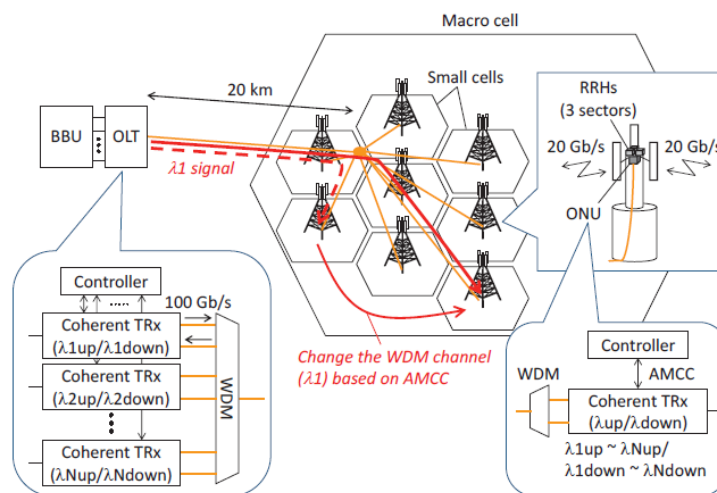


Figura 2-2 Arquitectura C-RAN 5G

Fuente: (Yoshima, 2016)

La ventaja de la arquitectura C-RAN en la red móvil 5G es que la misma presentará un bajo costo, baja latencia, alta capacidad y convergencia del fronthaul óptico con la red de radio y capacidad para admitir tecnología inalámbrica avanzada (Ranaweera, Wong, & Nirmalathas, 2017). C-RAN aporta

al enlace fronthaul 5G los aspectos técnicos que le permiten cumplir con los requerimientos establecidos como la robustez para soportar alta tasa de datos y tener una latencia específica para aplicaciones de usuario final, ya que estas aplicaciones son de alta sensibilidad al retardo (Yoshima, 2016).

2.2 Diseño de la forma de onda

El formato de modulación más empleado hoy en día en comunicaciones inalámbricas de banda ancha es multiplexación por división de frecuencia ortogonal (OFDM -Orthogonal Frequency Division Multiplexing), misma que se ha desplegado en sistemas como LTE, LTE-Advance, IEEE 802.11, IEEE 802.16 entre otros. OFDM ofrece características como la ortogonalidad entre las sub-portadoras, baja complejidad computacional y soporte de la tecnología de múltiples entradas y múltiples salidas (Multiple-input multiple-output –MIMO) (Fifth Generation Forum, 2016, pág. 177).

Sin embargo, la forma de onda OFDM no es un candidato idóneo para los escenarios 5G, ya que presentan ciertas desventajas tales como el hecho de que no es adecuada para sistemas de ultra-baja latencia, i.e. de menos de 1ms, (Anritsu Corporation, 2017) ya que debido a la presencia del prefijo cíclico (CP- cyclic prefix) empleado para combatir los canales multi-trayecto ocasiona que al reducir la duración del CP se produce un efecto contrario al deseado. Además, OFDM emplea bandas de guarda para disminuir la interferencia producida por la radiación de potencia fuera de la banda de frecuencia (OOB -out-of-band) dado por la forma de onda del pulso rectangular de OFDM el cual deteriora severamente la eficiencia espectral (Fifth Generation Forum, 2016, pág. 177).

Para superar las deficiencias de OFDM se introducen nuevas formas de onda que deben satisfacer los requerimientos de 5G. Estas nuevas formas de onda deben cumplir con ciertas propiedades como: capacidad para transmitir ráfagas cortas, baja radiación de potencia fuera de banda, robustez contra la interferencia intersímbolo (Inter Symbol Interference - ISI) y contra la interferencia interportadora (Inter Carrier Interference- ICI) y contar con un pulso bien localizado en el dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia (Fifth Generation Forum, 2016).

El diseño de las nuevas formas de onda se enfoca en esquemas multiportadoras como: multiportadora de banco de filtro (Filter Bank Multi-Carrier-FBMC), multiporadora de filtrado universal (Universal-filtered multicarrier- UFMC) y multiplexación por división de frecuencia generalizada (Generalized Frequency Division Multiplexing- GFDM).

Las características de los tres tipos de forma de onda antes mencionadas se resumen en la tabla 1-2, donde se consideran factores como: la eficiencia espectral, relación de potencia máxima y media (peak-to-average power ratio-PAPR) y la OOB, con la finalidad de determinar cualitativamente cual es el candidato idóneo para la red móvil 5G.

Tabla 1-2: Comparación entre las formas de onda para 5G

Propiedades	FBMC	UFMC	GFDM
Eficiencia Espectral	Alto	Alto	Medio
PAPR	Alto	Medio	Bajo
OOB	Bajo	Bajo	Bajo
Integración de MIMO	No	Si	Si
CP	No	No	Si
Ortogonalidad	Si	Si	No
Latencia	Larga	Corta	Corta
Requiere Sincronización	Baja	Baja	Media

Fuente: (Haijian & Pandong, 2016)

Realizado por: Berenice Arguero

Se puede concluir que GFDM es una forma de onda idónea para ser usada en la red móvil 5G, debido a que se trata de un esquema de modulación flexible, no-ortogonal, ya que su estructura soporta una mezcla de sub-portadoras dentro de una trama. Al encontrarse estas sub-portadoras entrelazadas GFDM tolera una baja latencia y soporta un tráfico de datos de ráfaga corta. Por otro lado, la interferencia intersímbolo es un inconveniente de la no-ortogonalidad de las sub-portadoras (Fifth Generation Forum, 2016).

Además, GFDM provee un mejor control de las emisiones OOB lo cual reduce el PAPR (Anritsu Corporation, 2017, págs. 56-60). Otra de las propiedades de GFDM es el manejo de la respuesta transitoria del canal. Al utilizar un solo prefijo cíclico se reduce la sobrecarga de la señal, aumenta la capacidad de la señal GFDM y la tolerancia a errores de sincronización. De ahí que puede decirse que esta modulación es un candidato ideal para futuras redes de comunicación inalámbricas (Browning, 2017).

GFDM provee una solución para la interface de radio 5G ya que es un esquema de modulación multiportadora, capaz de soportar los diferentes requisitos de las aplicaciones en tiempo real. Dado por el diseño de su estructura en tiempo y frecuencia basado en una modulación por bloques.

La estructura de GFDM está formada por un bloque B de muestras, donde las muestras están formadas por K sub-portadoras que llevan cada una M sub-símbolos. El tamaño del bloque está determinado por la ecuación 2.1. Donde el número de símbolos a transmitir es una limitante, ya que al ser este valor extremadamente alto provocaría un aumento de la latencia de la señal causando un deterioro en el rendimiento del sistema (Browning, 2017).

$$B = K * M \quad (2.1)$$

El modulador GFDM está organizado por las siguientes etapas, como muestran en la figura 3-2. La primera etapa es la de conversión serial a paralelo de los símbolos tomados del modulador digital, luego estos símbolos pasan a la etapa donde se distribuyen los símbolos en K sub-portadoras de M sub-símbolos en tiempo y en frecuencia para formar una muestra GFDM (Michailow, 2004).

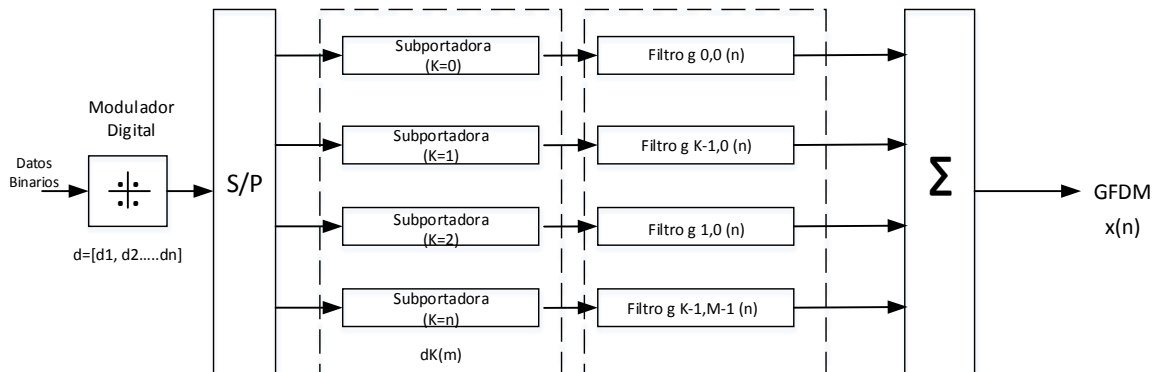


Figura 3-2 Modulador GFDM

Fuente: (Michailow, 2004)

Cada muestra es modulada por un prototipo de filtro circular determinado por ecuación 2.2:

$$g_{k,m}(n) = g[(n - mK) \bmod KM] e^{j2\pi \frac{k}{n} n} \quad (2.2)$$

Donde $g_{k,m}(n)$ es el prototipo del filtro circular ya sea Raised Cosine (RC), Root Rasied Cosine (RRC) o Dirichet. De la ecuación 2.2, para cualquiera de las versiones del filtro, el módulo representa el dominio del tiempo y la parte compleja el dominio de la frecuencia. Este desplazamiento circular determina la flexibilidad que caracteriza a GFDM. Como resultado de esta etapa se tiene la no-

ortogonalidad de las sub-portadoras donde la ISI e ICI podrían presentarse. Además, en este proceso se reduce las emisiones OOB (Doufexi & Nix, 2016).

Finalmente, está la etapa de superposición de las sub-potadoras moduladas para formar la señal GFDM, descrita por un vector resultante $x[n]$ en la ecuación 2.3, para ser transmitida.

$$x[n] = \sum_{k=0}^{K-1} \sum_{M=0}^{M-1} d_{k,M} g_{k,M}[n] \quad (2.3)$$

También puede ser representado por una estructura en bloque D, cuya matriz $(KM \times M)$ está construida por el desplazamiento circular de longitud KM (Shravan, Mani, & Drosopoulos, 2016).

$$D = \begin{pmatrix} d_0(0) & \cdots & d_0(M-1) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{K-1}(0) & \cdots & d_{K-1}(M-1) \end{pmatrix} \quad (2.4)$$

2.3 Red óptica pasiva (Passive Optical Network -PON)

Una solución atractiva para el incremento del ancho de banda y de la velocidad de transmisión para las redes de próxima generación es la utilización de la red óptica pasiva (PON) de alta velocidad para cubrir con los requerimientos que este tipo de redes necesitan (Bindhaiq & Zulkifli, 2014).

PON es una infraestructura convergente de acceso bidireccional con una topología punto multipunto de fibra óptica, dirigido a consumidores masivos, clientes residenciales y empresas. Se caracteriza por ser un sistema tolerante a fallas con una reducción en los gastos operacionales, ya que emplea elementos pasivos dentro de la infraestructura de la red (Kawamura, 2016). En la figura 4-2 se observa como está formada la red PON. La línea óptica terminal (Optical Line Terminal -OLT) constituye el transmisor óptico, la unidad de red óptica (Optical Network Unit -ONU) representa el receptor óptico, y la red de distribución óptica (Optical Distribution Network -ODN) es la derivación de la fibra óptica formada por los splitters.

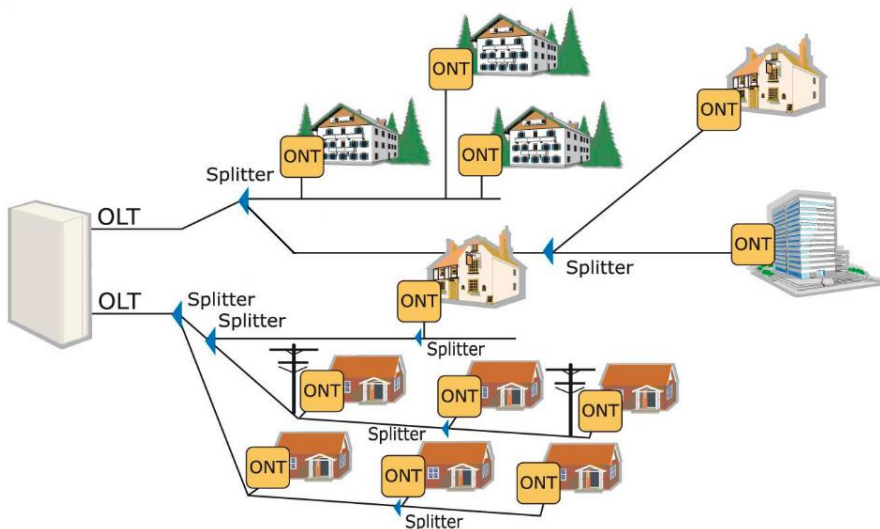


Figura 4-2 Red óptica pasiva (PON)

Fuente: (Fuentes&Martínez,2011)

Actualmente se han estandarizado y comercializado distintas tecnologías como PON basada en multiplexación por división de tiempo (time division multiplexing-PON, TDM-PON) para la cual los estándares más implementados han sido la Gigabit Ethernet PONs (GE-PONs) de la IEEE (IEEE 802.3ah) y la Gigabit-PON (GPON) de la UIT (ITU-T G.984). GPON es sin duda el estándar PON más desplegado a nivel mundial con una velocidad de transmisión de datos de 1.25 Gb/s de subida y 2.5 Gb/s de bajada (Bindhaiq & Zulkifli, 2014).

A partir del año 2015 se encuentra disponible e estándar de red óptica PON de nueva generación – etapa 2 (next-generation passive optical network stage 2 - NG-PON2), que ofrece una capacidad de 40 Gb/s hasta 80 Gb/s a través del empleo de cuatro y ocho longitudes de onda, respectivamente, y el uso de multiplexación por división de longitud de onda (Wavelength Division Multiplexing WDM) en combinación con la multiplexación por división de tiempo. Se trata entonces de una red híbrida del tipo TWDM PON (Rohde, Coherent Ultra Dense WDM Technology for Next Generation Optical Metro and Access Networks, 2014).

Existen propuestas a su vez que emplean la división de frecuencia ortogonal en PON (Orthogonal Frequency Division Multiplexing – OFDM PON), el uso del procesamiento digital de señales (Digital Signal Processing – DSP-assisted PON) y la multiplexación por división de longitud de onda ultra densa (Ultra-Dense Wavelength Division Multiplexing – UDWDM PON).

En TDM-PON se tiene un canal de longitud de onda única, misma que es compartida por todos los usuarios con la ayuda de un divisor de potencia en el nodo remoto. Esta compartición crea dificultad al momento de acomodar los próximos suscriptores debido a la aparición de diversos servicios. Recientemente, se han realizado estudios para el despliegue de WDM y UDWM para resolver dicha limitante los cuales se consideran principales arquitecturas de las redes de próxima generación (Muciaccia & Gargano, 2015), (Bindhaiq & Zulkifli, 2014).

WDM es una técnica de multiplexación, donde diferentes canales o longitudes de ondas moduladas por una fuente láser independientemente son combinados en una misma fibra óptica. Los sistemas actuales se emplean de 4 a 32 canales, permitiendo un uso eficiente de la fibra, lo que mejora sustancialmente la capacidad e incrementa en el ancho de banda del sistema (Siddiqua, 2016).

Una técnica para ampliar aún más la capacidad de la red óptica es el uso de UDWDM ya que permite disponer de tantas longitudes de onda que es posible asignar una de ellas a cada usuario con tasa de datos flexible. Este concepto se conoce como Wavelength-To-The-User (WTTU). En este tipo de redes la proporción de división es superior a 64 canales. El problema de este tipo de redes es el alto costo de despliegue que exigen pues requieren el uso de técnicas de transmisión y recepción coherente (Segarra, Sales, Prat, & Kazovsky, 2017).

2.4 Receptor óptico directo o no-coherente

El receptor óptico no coherente está basado por un fotodetector de baja complejidad y de bajo costo, que convierte la señal óptica recibida en una señal eléctrica. Adicionalmente se puede incorporar un preamplificador de bajo ruido y un circuito de decisión con el objetivo de comparar el umbral de referencia y la señal de sincronización para recuperar la secuencia de bits transmitidos (Reyes, 2015) como se detalla en la figura 5-2.

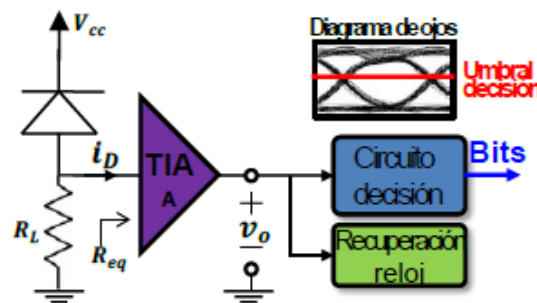


Figura 5-2 Esquema de detección directa
Fuente: (Reyes, 2015, pág. 37)

El fotodiodo es inversamente polarizado produciendo una fotocorriente proporcional a la potencia óptica recibida. La amplitud de la señal es proporcional a la intensidad óptica en la que fue modulada. El fotodiodo añade a la señal recibida corrientes generadas por el ruido térmico, ruido de disparo, y ruido producido por la fotodetección (Reyes, 2015, pág. 37).

Estos dispositivos están restringidos por la intensidad de la señal, ya que únicamente detectan y demodulan la intensidad de la señal óptica. Al ser la señal codificada en una sola polarización se reduce la eficiencia espectral y la eficiencia de potencia. En consecuencia, la información de la fase de la señal se pierde (Barros & Kahn, 2008, pág. 759). En la figura 6-2 se muestra el esquema de la detección directa, donde la señal óptica $E(t)$ que ingresa al receptor esta descrito por la ecuación 2.1 obteniendo a la salida la señal eléctrica $i(t)$, i.e. un pulso de potencia óptica es convertido en un pulso de corriente.

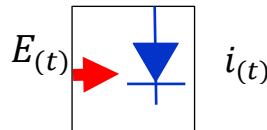


Figura 6-2 Esquema de detección directa
Fuente: Berenice Arguero

$$E(t) = A(t)e^{j\theta(t)}e^{j\omega(t)} \quad (2.1)$$

La señal óptica recibida esta representa por la amplitud de la señal recibida (A), la fase $e^{j\theta(t)}$ y la frecuencia angular $e^{j\omega(t)}$ determinada en la ecuación 2.1.

La respuesta de la detección directa es la señal eléctrica $i(t)$ determinada por la ecuación 2.2, donde la corriente eléctrica es proporcional a la potencia del campo óptico $P(t)$ que ingresa en el receptor, la cual está relacionada con la capacidad de respuesta del fotodetector (R) y los componentes de ruido térmico generado en el proceso del fotodetector (θn). Por lo tanto, la información transmitida en fase de la señal se pierde (Torrengo, 2011, págs. 13-15).

$$i(t) = RP(t) + \theta n(t) \quad (2.2)$$

2.5 Receptor óptico coherente

Es un sistema más complejo y con un alto costo, está formado por un juego de fotodiodos, un oscilador local, elementos ópticos y electrónicos de alto rendimiento. El receptor coherente es capaz de extraer

la información completa de la señal recibida en amplitud, fase y frecuencia. Esto conlleva a un incremento en la capacidad de la detección y de la eficiencia espectral.

En este sentido es pertinente resaltar ciertas ventajas que tiene la detección coherente respecto a la detección directa. Existe un incremento en la sensibilidad en el receptor de hasta 20dB, dependiendo del formato de modulación y los mecanismos de multiplexación empleados (Alzate, 2011). Cabe destacar que la detección coherente mitiga los efectos no lineales de la fibra, debido a la respuesta no lineal del sistema complejo de fotodiodos, mejorando la capacidad y alcance de los sistemas ópticos.

La figura 7-2 se observa el esquema del detector coherente, mismo que incluye un acoplador denominado “híbrido de 90°” debido a que combina un acoplador 2x2 con un desfasador de 90°, donde se combina la señal de entrada y la señal del oscilador local. Como resultado se obtiene dos señales de corriente i_1 e i_2 , modeladas idealmente como una respuesta no lineal con una frecuencia intermedia (Intermediate Frequency- IF). IF es la diferencia de frecuencia entre la señal de entrada con la frecuencia del oscilador local descrita en la ecuación 2, donde ω_s es la frecuencia de la señal óptica recibida y ω_{LO} corresponde a la frecuencia del oscilador local (Reyes, 2015, pág. 97).

$$\omega_{IF} = \omega_s - \omega_{LO} \quad (2.3)$$

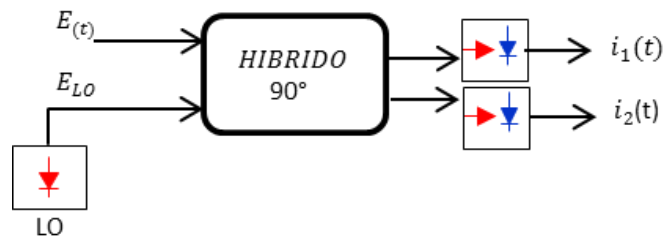


Figura 7-2 Híbrido 90°

Fuente: (Reyes, 2015, pág. 97)

La frecuencia intermedia determina la configuración que adopta el receptor óptico, como se describe a continuación:

- Cuando la frecuencia intermedia es igual a cero ($\omega_{IF} = 0$), es un sistema coherente homodino, es decir la frecuencia del oscilador local y la frecuencia de la señal recibida son iguales. Para estos sistemas se requiere un constante control de la frecuencia y de la fase del transmisor y del receptor.

- Si la frecuencia intermedia es distinta a cero ($\omega_{IF} \neq 0$), es un sistema coherente heterodino, donde la frecuencia del oscilador local es diferente a la frecuencia de la señal recibida. En este tipo de sistemas, la sensibilidad del receptor se reduce en 3dB. Para el efecto se emplean circuitos de retroalimentación eléctricos para mejorar el rendimiento del sistema (Reyes, 2015, págs. 97-99).
- En un sistema intradino la frecuencia intermedia es distinta a cero ($\omega_{IF} \neq 0$), pero existe una mínima diferencia entre la frecuencia/fase del oscilador local y de la señal recibida. El problema de estos sistemas es que produce una ligera rotación en el plano IQ en el proceso de digitalización (Reyes, 2015, págs. 97-99) por lo que se debe realizar un post-proceso de la señal.

Del diagrama de la figura 7-2, se puede deducir que las ecuaciones 2.6 y 2.7 representan la envolvente compleja de la señal de recibida $E(t)$ y de la señal E_{LO} , respectivamente. Donde, P es la potencia óptica de la señal de entrada, P_{LO} la potencia óptica de LO, θ contiene la información de fase modulada y θ_{ns} , θ_{LO} representan el ruido de fase generado por los dispositivos respectivamente.

$$E(t) = Re\{E * e^{j\omega t} * \widehat{E}\} \quad (2.4)$$

$$E_{LO}(t) = Re\{E_{LO} * e^{j\omega t} * \widehat{E}_{LO}\} \quad (2.5)$$

$$E(t) = \sqrt{P} * e^{j(\theta + \theta_{ns})} \quad (2.6)$$

$$E_{LO}(t) = \sqrt{P_{LO}} * e^{j\omega_{IF} t} * e^{j\theta_{LO}} \quad (2.7)$$

A la salida del híbrido 90° se obtiene dos señales de corriente como se describe en la ecuación 2.8, siendo $\Delta\theta$ la diferencia entre el ruido θ_{ns} y θ_{LO} .

$$i_{12} = \frac{R}{2} \{P + P_{LO} \pm 2\sqrt{P * P_{LO}} \sin(\omega_{IF} t + \Delta\theta + \theta) * \widehat{E} * \widehat{E}_{LO}\} \quad (2.8)$$

En la ecuación 2.8, $(P + P_{LO})$ representa la interferencia entre la señal recibida y la señal de referencia LO, misma que posteriormente se puede cancelar a través de un procesamiento en el dominio electrónico o al emplear una detección balanceada coherente. Obteniendo una señal de corrientes descrita en la ecuación 2.10. La detección balanceada suprime la componente DC y la señal de corriente depende de la amplitud y fase de la señal.

$$i_{DE} = i_1 - i_2 \quad (2.9)$$

$$i_{DE} = 2R\sqrt{P * P_{LO}} \sin(\omega_{IF} t + \Delta\theta + \theta) * \widehat{E} * \widehat{E}_{LO} \quad (2.10)$$

Por otro lado, para cancelar el ruido de fase se puede emplear la ecuación 2.8 (Yao & Chen, 2017, pág. 977) para las dos señales de corriente obtenidas a la salida del híbrido de 90°. Esta operación mejora la potencia de la señal.

$$I_o = i_1^2 + i_2^2 \quad (2.11)$$

2.6 Capacidad de los sistemas ópticos

El desafío de hoy en día es aumentar la capacidad de los sistemas ópticos, que no solo requieren alta velocidad sino buscan la flexibilidad de adaptarse a otras tecnologías existentes, así como a la creciente demanda de tráfico por parte de los usuarios. El incremento del rendimiento de las redes de acceso basadas en redes ópticas pasivas (PON) se encuentran en constante desarrollo (Kawamura, 2016).

Dentro de este campo se han realizado varias investigaciones, que buscan incrementar el rendimiento de las redes PON, enfocadas en la implementación de redes UDWDM-PON utilizando técnicas de transmisión y recepción coherente en conjunto con formatos avanzados de modulación en el dominio óptico y con el procesamiento digital de señales.

(Dong, Chien, Yu, Zhang, & Cheng, 2015) en su investigación, propone una red PON combinada con multiplexación de división de longitud de onda ultra densa (UDWDM-PON), en la cual el ancho de banda requiere 16 veces menos capacidad en los transmisores, y en los terminales ópticos de línea (OLT), lo que reduce el costo y consumo de energía. Como resultado lograron un rendimiento de 12 Tb/s con 75 sub-portadoras de 10 Gb/s en la OLT, alojando 1200 usuarios. Se espera satisfacer la enorme demanda de capacidad en las redes de siguiente generación en redes heterogéneas de acceso basado en la detección directa. Sin embargo, se ha prestado interés en el estudio de sistemas WDM-PON con detección coherente, ya que son sistemas con una sensibilidad superior en el receptor.

(Smolorz, Gottwald, Rohde, & Poustie, 2011) en su trabajo investigativo presenta una UDWD-PON con procesamiento de datos en tiempo real empleando un sistema de recepción coherente. Como resultado obtuvo una sensibilidad en el receptor de -53dBm en un BER de 10^{-4} a 311 Mb/s, con un presupuesto del enlace óptico de 50dB. Mostrando una viabilidad en el sistema de acceso óptico gracias al efecto de amplificación local en el receptor, por lo que no se requiere el uso de filtros en la red de distribución óptica mejorando así la transmisión de la señal.

Otro estudio relevante fue conducido por (Rohde, Field trials of a coherent UDWDM PON: Real-time LTE backhauling, legacy and 100G coexistence, 2014) en el cual realizó pruebas de coexistencia entre los sistemas backhauling LTE, GPON, RF-Video, 100 Gb/s y OTDR dentro de una misma fibra. En dicho trabajo se demuestra que es posible la coexistencia de diferentes tipos de señales en una red UDWDM-PON coherente sobre fibra. Además, se señala que se mejoró la capacidad de la transmisión obteniendo una sensibilidad en el receptor de -49dBm para un BER de 10^{-3} con el FEC desactivado.

En este contexto (Rohde, Coherent Ultra Dense WDM Technology for Next Generation Optical Metro and Access Networks, 2014) describen las capacidades de diseño e implementación de UDWDM-PON para redes de acceso y las redes de acceso metro. Dicho sistema es capaz de proporcionar hasta 1000 longitudes de onda con una velocidad de datos que varía desde 150 Mb/s hasta 10 Gb/s sobre 100 km de fibra. En su propuesta los autores afirman que UDWDM-PON es apta para implementar el fronthaul y el backhaul de redes móviles de nueva generación.

Por otro lado (Shahpari & Ferreira, 2015) indagó sobre la nueva arquitectura de transmisión coherente entre la OLT y la ONU en una red PON, para soportar 1 Gb/s por usuario. Esto se demostró mediante el desarrollo experimental bidireccional de una transmisión coherente UDWDM-PON a 12x10 Gb/s sobre un híbrido de 80km de fibra óptica monomodo estándar (SMF) en conjunto con un enlace inalámbrico óptico de alta densidad, con modulación 16QAM y desplazamiento de frecuencia digital. De igual forma en el referido artículo se concluye que la tecnología coherente es una solución para las redes de acceso de la siguiente generación.

Varios trabajos de investigación muestran las ventajas de la transmisión coherente en términos de un alto rendimiento y alta sensibilidad en el receptor en PON (Chao, Hongwei, Minghua, & Shizhong, 2011) propone una red UDWDM-PON coherente que emplea un receptor heterodino de 64 canales a 10 Gb/s sobre 25km de fibra óptica SMF, soportando un ancho de banda simétrico de 1 Gb/s por usuario, donde la sensibilidad del receptor aumenta en gran medida con lo que se incrementa a su vez la distancia de transmisión y el número de usuarios.

Un punto importante es el despliegue de la arquitectura de acceso por radio (C-RAN Centralized-Radio Access Network) de la red móvil 5G. En este tipo de arquitecturas existe un aumento considerable de la capacidad para los enlaces móviles fronthaul y backhaul. Según (Browning, 2017) usar WDM-PON mejorará los enlaces móviles, donde los servicios inalámbricos y alámbricos convergen en la red de distribución. En su trabajo investigativo proponen la convergencia de GFDM (Generalized Frequency Division Multiplexing) y UF-OFDM (Universal Filtered Orthogonal Frequency Multiplexing) como candidatos de 5G en una sola portadora, empleando una modulación

por amplitud de pulsos de cuatro niveles (Pulse Amplitude Modulation - PAM-4) a 10Gb/s. Como resultado se observó una variación en los espaciamientos de los canales propios de cada forma de onda.

Otro estudio similar es realizado por (Doufexi & Nix, 2016) en el que afirma que la capa física 5G debe soportar aplicaciones con diferentes requerimientos como alta velocidad, bajo consumo de energía y baja latencia, de ahí que GFDM es el candidato idóneo para 5G. El resultado obtenido del estudio comparativo de rendimiento entre GFDM y OFDM, se determinó una disminución de la radiación fuera de banda (OOB- Out of Band) de GFDM.

Además, (Yoshima, 2016) demuestra experimentalmente un sistema UDWDM-PON coherente de 100 Gb/s para el fronthaul de 5G, formado por 8 celdas pequeñas de 20 Km de transmisión, donde como resultado se obtuvo una mejora en la sensibilidad del receptor logrando un valor de -26dBm.

CAPÍTULO III

3. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

En este capítulo se establece la metodología de la investigación además de la arquitectura del sistema óptico propuesto, incluyendo las configuraciones de los receptores ópticos tanto para detección no-coherente como coherente. Se detalla además el modelo numérico de la forma de onda para la red móvil 5G, con el fin de realizar la comparación del desempeño de los receptores ópticos propuestos.

3.1 Diseño de la investigación

El diseño de la presente investigación tiene como propósito cumplir con los objetivos de estudio. Siendo este de tipo cuasi-experimental, ya que se manipulará intencionalmente la variable independiente permitiendo medir la variable dependiente en un nivel de referencia establecido. Con la finalidad de realizar el análisis de resultados comparativo entre los casos de estudios de la co-simulación numérica con el software Optsim y Matlab. Donde OptSim es una herramienta para el diseño y simulación de sistemas de comunicación óptica a nivel de propagación de la señal. Empleando técnicas de simulación de última generación con una interfaz gráfica de usuario fácil de usar e instrumentos de medición similares a los de laboratorio (SYNOPYS, 2018). Mientras que Matlab es una herramienta matemática de desarrollo de algoritmos y modelos matemáticos (MathWorks, 2018).

3.1.1 Métodos de investigación

Empleando el método experimental se establecerá una comparación del desempeño del receptor óptico coherente y no-coherente en una transmisión de la señal GFDM para determinar de manera cuantitativa aquella que obtuvo un mejor desempeño. Así mismo recurriendo al método analítico-sistemático se realizará un análisis de desempeño de los receptores ópticos independientemente, estableciendo valores de potencia óptica que permitan cumplir con el estándar para redes PON con un valor de EVM y BER adecuado para la transmisión.

3.1.2 Enfoque de la investigación

El enfoque cuantitativo de la investigación empleará los resultados obtenidos del BER, mismos que se relacionarán con distintos valores de potencia recibida (correspondientes a la sensibilidad exigida en el receptor para alcanzar un determinado valor de BER). El valor de BER que se empleará como valor objetivo (valor mínimo a ser alcanzado) es un BER de 10^{-3} , dado que dicho valor constituye el límite estadístico para poder alcanzar un BER de 10^{-9} a través del empleo de corrección de errores en el receptor (Forward Error Correction – FEC). A través de la comparación de los valores de BER obtenidos a través de las dos técnicas de transmisión-recepción a ser empleadas, se podrá determinar cuál de las dos técnicas tiene mejor desempeño (Schmogrow & Nebendahl, 2012).

3.1.3 Alcance de la investigación

El análisis comparativo del desempeño del receptor óptico no-coherente y coherente mediante una co-simulación numérica con el software OptSim- Matlab constituye un estudio descriptivo, cuyo propósito es medir la probabilidad de error de bit (BER) y el vector de magnitud de error (Error Vector Magnitude - EVM) a través de la variación de la potencia de recepción óptica, en el sistema de transmisión de la señal GFDM a 10 Gb/s.

En base a los resultados obtenidos se determinará valores de potencia óptica y de radio frecuencia de entrada que permitan cumplir con el estándar para redes PON para obtener un BER o un EVM adecuados para la transmisión, y de esta manera comparar el desempeño de transmisión de GFDM.

3.1.4 Operacionalización de variables

Partiendo de la hipótesis planteada en el trabajo de investigación se identifican como variable dependiente el BER (el mismo que a su vez se relaciona con el EVM), y como variable independiente la potencia de la recepción óptica. Determinado en la tabla 1-3.

Tabla 1-3: Conceptualización de las variables

Variable	Tipo	Concepto
Potencia de recepción óptica	Variable Independiente	Energía óptica que ingresa en el receptor, medido en dBm.
Tasa de errores de bits (BER –bit error rate)	Variable Dependiente	Conteo estadístico del número de errores que ocurren dentro de una secuencia dada de bits

Realizado por: Berenice Arguero

Estas dos variables están relacionadas directamente, es decir, si la potencia de recepción es menor el valor del BER incrementa. Un valor alto de BER (esto es, un gran número de bits errados) se relaciona con un bajo desempeño de la red de comunicación, como se observa en la tabla 2-3. Los indicadores e índices de operacionalización de variables son factores importantes en el análisis comparativo del desempeño de los receptores ópticos los mismos que evaluarán y determinarán cual obtuvo un mejor desempeño de manera cuantitativa.

Tabla 2-3: Operacionalización de variables

Variable	Indicadores	Índices
Potencia de recepción óptica	Valor de potencia óptica recibida en un nivel de BER de 10^{-3}	Parámetros de la norma UIT- G.984.2
Tasa de errores de bits (BER –bit error rate)	$BER = \frac{\text{Número de errores}}{\text{Número total de bits transmitidos}}$	Parámetros de la norma UIT- G.984.2

Realizado por: Berenice Arguero

3.1.5 *Matriz de consistencia*

En la tabla 3-3 se muestra la matriz de consistencia, la cual permite evaluar la relación entre las variables, indicadores, técnicas e instrumentos, con el problema de investigación.

Tabla 3-3: Matriz de consistencia

Formulación del problema	Objetivo General	Hipótesis	Variable	Indicadores	Índices	Técnica	Instrumento
Establecer valores de potencia óptica y de radio frecuencia que permitan cumplir con el estándar para redes PON y un EVM adecuado para la transmisión de GFDM, utilizando receptores ópticos coherentes y no coherentes y determinar si existe una diferencia significativa entre la sensibilidad de estos tipos de receptores.	Analizar el desempeño de una transmisión GFDM utilizando receptores ópticos coherentes y no coherentes	Habrá diferencia significativa entre la sensibilidad del receptor no-coherente y la sensibilidad del receptor coherente al transmitir la señal GFDM sobre 20 km de fibra a 10Gb/s.	Potencia de recepción óptica.	Valor de potencia óptica recibida.	Parámetros de la norma UIT-G.984.2	Observación	Medidor de potencia óptica en el simulador de Optsim
			BER	Valor del BER	Parámetros de la norma UIT-G.984.2	Observación	Co-simulación numérica.

Realizado por: Berenice Arguero

3.1.6 Unidad de análisis

Se define como unidad de análisis en esta investigación al desempeño de los receptores ópticos coherentes y no-coherentes.

3.1.7 Población de estudio

Una vez definida la unidad de análisis se delimita la población, para este tipo de investigación la población de estudio serán los datos enviados a través de los sistemas de transmisión óptica (no-

coherente y coherente), según la planificación de las mediciones retrospectivas el único valor obtenido en el nivel de referencia de la variable dependiente se medirá 50 veces (Nievas, 2017) para cada caso experimental propuesto.

3.1.8 Recolección datos

La recolección de datos cuantitativos se realizará mediante los instrumentos de medición incorporados en el software de simulación. Específicamente, para medir la potencia recibida (valor que constituye la sensibilidad del receptor) se utilizará un medidor de potencia óptica en el software OptSim y para determinar el BER se empleará una instancia de co-simulación, dentro de OptSim, del software Matlab.

3.1.9 Análisis de datos

Para el análisis se inicia con la estructuración de los datos que serán representados por gráficas características como: la gráfica del BER respecto a la sensibilidad del receptor y la gráfica del EVM respecto a la sensibilidad del receptor. Los datos serán analizados estadísticamente con el fin de realizar la prueba de la hipótesis planteada.

3.1.10 Validación de la norma UIT G948.2

La validación de la norma UIT G948.2 se basará en la comparación de los resultados obtenidos en la experimentación, con los valores establecidos en la norma UIT G.984.2. Tomando en cuenta que los esquemas propuestos se acogen a la gama de atenuación entre 15 y 30 dB correspondiente a la Clase C de la atenuación mínima y máxima exigidas en la ODN de una PON. La tabla 4-3 indica los parámetros determinados para la ODN, OLT y la ONU para una transmisión óptica utilizando el estándar GPON.

Tabla 4-3: Parámetros de la norma UIT- G.984.2

Elemento	Unidad	Especificación
ODN		
Tipo de fibra	-	Rec. UIT-T G.652
Código de línea	-	NRZ pseudoaleatorizado
Gama de atenuación (Rec. UIT-T G.982)	dB	Clase C: 15-30
Máximo alcance lógico	km	60
Máximo alcance lógico diferencial	km	20
OLT		
Potencia media inyectada MÍN	dBm	Clase C: +5
Potencia media inyectada MÁX	dBm	Clase C: +9
ONU		
Sensibilidad mínima	dBm	Clase C: -26
Sobrecarga mínima	dBm	Clase C: -4

Fuente: (International Telecommunication Union, 2016)

Realizado por: Berenice Arguero

La validación se realizará de manera cuantitativa con los datos obtenidos en la experimentación de los esquemas propuestos. Para la comparación del desempeño de la transmisión al utilizar detección no-coherente y recepción coherente, se tomarán los valores estadísticos del valor esperado (momento central de orden uno o “media”), para un BER de 10^{-3} , de todas las muestras obtenidas en las 50 repeticiones de la experimentación.

Empleando dichos valores y mediante el análisis de resultados que se presenta en el capítulo IV, a través de las gráficas BER y EVM versus potencia de recepción. Si los resultados obtenidos en la experimentación, satisfacen las condiciones establecidas en la norma UIT G.984.2 se aceptará los lineamientos de configuración para la transmisión de la señal GFDM como forma de onda de 5G empleando la modulación 4QAM y 16 QAM sobre 20 km a 10Gb/s.

3.2 Metodología de implementación del sistema de comunicación

3.2.1 Modelo numérico de la señal GFDM

El diseño utilizado permite realizar una investigación comparativa entre el desempeño del receptor coherente y del receptor no-coherente, mediante la evaluación del comportamiento de la tasa de errores binario (BER –bit error rate) a través de un conteo estadístico del número de errores que ocurren dentro de una secuencia dada de bits. Dicho conteo se basa en la comparación simple de los bits transmitidos con los recibidos y constituye a su vez la estimación de la probabilidad de que

cualquier bit transmitido a través del sistema sea recibido con error (Conference Proceedings, 2004). Se emplea también la magnitud del vector de error (EVM- Error Vector Magnitude) el cual mide la media de la distancia entre el punto óptimo de la posición del símbolo en cuadratura con respecto a la posición medida. Se utiliza como escenario de la experimentación una co-simulación OptSim-Matlab. Basada en un enlace fronthaul, formado por una red PON con una distancia de 20 Km entre la ONU y la OLT, de acuerdo al estándar UIT-T G.984.3 (International Telecommunication Union, 2005).

Para el propósito del análisis, se seleccionó la señal GFDM que será transmitida en el enlace fronthaul de la red móvil 5G. El transmisor se implementó mediante un script de Matlab empleando la interface de la co-simulación con Matlab disponible en OptSim.

Para el efecto, se genera un vector $b = [b_0, b_1 \dots \dots, b_n]$ de entrada de 10100 símbolos aleatorios, lo cual permite realizar un conteo estadístico confiable para un BER de 10^{-3} . Los símbolos del vector base son mapeados en un modulador digital produciendo el vector $d = [d_0, d_1 \dots \dots, d_n]$ de símbolos M-QAM. Se considera dentro de nuestro análisis el uso de un canal AWGN característico, el cual permite asumir que la probabilidad de error en los bits sigue una función de distribución Normal (también denominada Uniforme), es decir que los bits de la secuencia de datos transmitida tienen cada uno de ellos la misma probabilidad de error. Luego los bits pasan al modulador GFDM donde los símbolos del vector d son distribuidos en k sub-portadoras de M sub-símbolos obteniendo la matriz $d_{k,M} = [d_{k,0}, d_{k,1} \dots \dots, d_{k,M-1}]$ y cada sub-símbolo $d_{k,M}$ se desplaza circularmente en tiempo y en frecuencia como respuesta impulsiva discreta del filtro digital empleado definido por $g_{k,M}[n]$ donde n es el índice de sub-muestreo. Finalmente se superponen las sub-portadoras moduladas para formar la señal GFDM, descrito por un vector resultante $x[n]$, determinado por $x[n] = \sum_{k=0}^{k-1} \sum_{M=0}^{M-1} d_{k,M} g_{k,M}[n]$ que será transmitido en el bloque GFDM de tamaño $kM \times kM$. La tabla 5-3 enlista las propiedades empleadas para la generación de la señal GFDM en Matlab (Michailow, 2004) (Doufexi & Nix, 2016).

Tabla 5-3: Parámetros de simulación de la señal GFDM

Parámetro	Valor
Número de sub-portadoras (k)	512
Número de sub-portadoras activas (Kon)	100
Número de sub-símbolos por cada símbolo GFDM (M)	101
Esquema de modulación	4QAM/16QAM
Factor Roll-on (a)	0.3
Prototipo de filtro	Pulse shaping filter (rrc_fd)
Número de bloques (B)	1

Realizado por: Berenice Arguero

Para la sincronización de la señal se genera símbolos pseudo-aleatorios de secuencias binarias (Pseudorandom Binary Sequence- PRBS), cuya longitud es de 128 símbolos, transmitiéndose al inicio de la señal GFDM como se observa en la figura 1-3.

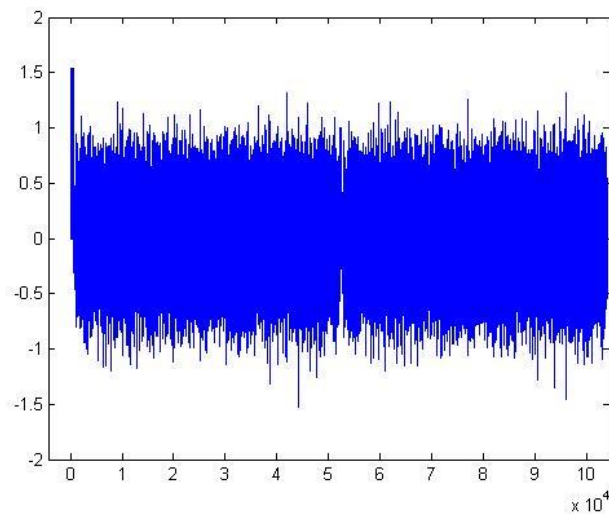


Figura 1-3 Señal GFDM en tiempo-con PRBS para sincronización

Fuente: Berenice Arguero

Siguiendo con el proceso los símbolos GFDM son subidos en frecuencia a 17GHz empleando un modulador en cuadratura cuyo ancho de banda es de 33 GHz. En la figura 2-3 se observa el espectro de la señal GFDM a ser transmitida.

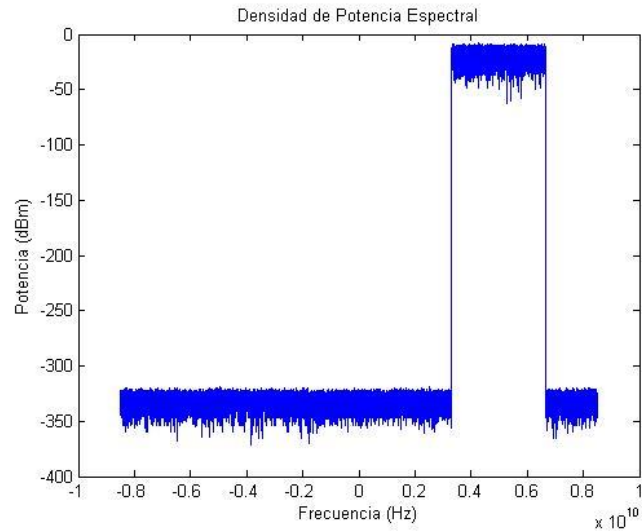
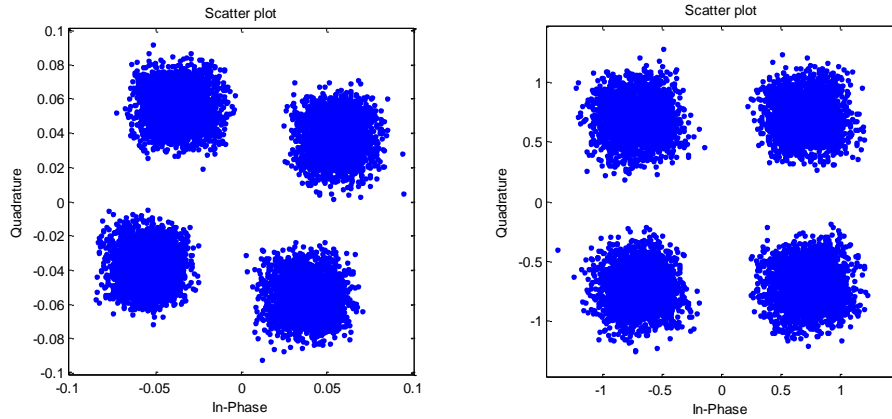


Figura 2-3 Espectro de la señal GFDM
Fuente: Berenice Arguero

En el receptor, la señal GFDM es recuperada y digitalizada por el bloque de Matlab en Optsim. En primer lugar, se normaliza la potencia de señal recibida a -25dBm aumentando la potencia de entrada con la finalidad de reducir la dispersión de las no linealidades y ajustar con el valor de la potencia de la señal transmitida.

A continuación, los símbolos recuperados son sincronizados con una señal de referencia PRBS de igual longitud empleada en el transmisor. La señal de referencia ingresa al mezclador de sincronización con la señal recibida para realizar una sincronización horizontalmente, es decir, el mezclador busca la secuencia PRBS en la señal recibida mediante un correlador horizontal. La señal es sincronizada cuando las secuencias PRBS están completamente alineadas; esto es, cuando se tiene un máximo de autocorrelación. Si la autocorrelación es cero la señal es desplazada hasta alinearse con la señal de sincronización (Sallen, Valenzuela, & Agustí, 2003).

Una vez sincronizada la señal, la PRBS es retirada para luego realizar la ecualización del canal. Para mitigar la distorsión producida por la interferencia inter-símbolo se empleó un filtro ecualizador forzador de ceros (Zero Forcing - ZF) para compensar la respuesta frecuencial del canal (Sallent Roig & Pérez Romero, 2014) corrigiendo los símbolos en amplitud y fase, como se observa en la figura 3-3.



(a) Símbolos 4-QAM sin ecualizar (b) Símbolos 4-QAM ecualizados

Figura 3-3 Diagrama de constelación 4-QAM (a) símbolos sin ecualizar, (b) los símbolos ecualizados.

Fuente: Berenice Arguero

Los símbolos ecualizados ingresan al demodulador M-QAM para recuperar los símbolos transmitidos para finalmente calcular el BER y el EVM. Estos parámetros serán los que evalúen el desempeño de del receptor no-coherente y el receptor coherente del sistema óptico propuesto.

3.2.2 *Modelo del sistema óptico*

Mediante el software de simulación de sistemas ópticos OptSim se llevó a cabo la transmisión de la señal GFDM generada en Matlab sobre una red PON, empleando dos esquemas de detección en la ONU mediante el empleo de una co-simulación con Matlab.

El sistema óptico de comunicación propuesto está formado por tres etapas: el transmisor óptico, la fibra óptica y el receptor óptico. En la figura 4-3 se observa el diagrama de bloques del sistema donde los bloques punteados representan la herramienta de Matlab, mientras que la línea continua representa la herramienta de simulación de OptSim dentro de un mismo entorno.

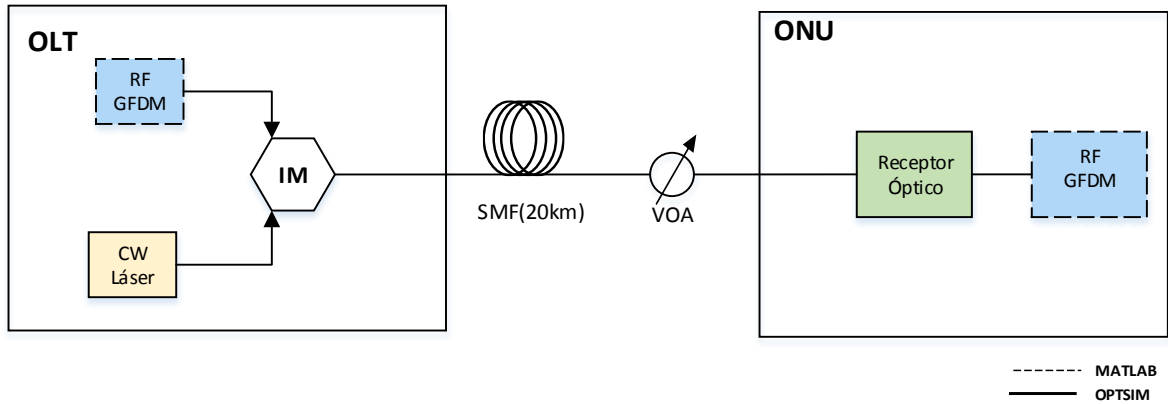


Figura 4-3 Sistema de transmisión óptico PON

Fuente: Berenice Arguero

El transmisor óptico está conformado por el bloque de co-simulación de Matlab y una fuente láser de longitud continua (CW-Continuous Wave) cuyos parámetros son: longitud de onda de trabajo 1550 nm, ancho de pulso 10 MHz y 6 dBm de potencia óptica.

La señal GFDM es modulada por intensidad con la etapa de modulación externa a la fuente a través de un modulador Mach-Zender. Posteriormente la señal modulada es propagada a través de la fibra óptica a 10 Gb/s en 20 Km de fibra. En la figura 5-3 se observa el espectro de la señal modulada GFDM mediante un analizador de espectro óptico de OptSim.

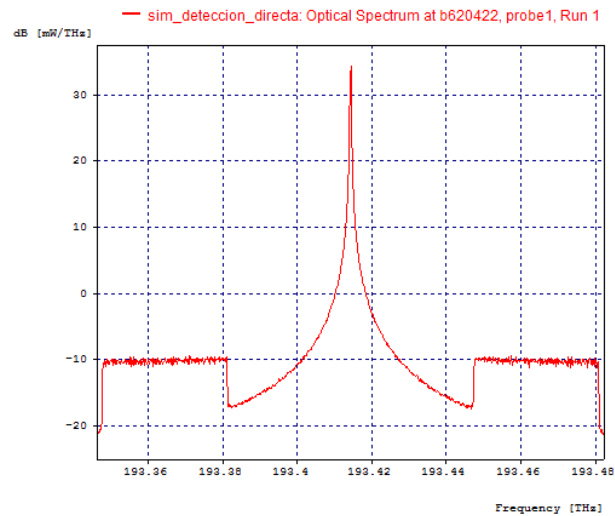


Figura 5-3 Espectro óptico de la señal GFDM

Fuente: Analizador de espectro óptico-Optsim (OSA)

El enlace óptico está caracterizado por una fibra monomodo G.652D, considerando los siguientes parámetros experimentales: longitud de la fibra 20 Km, atenuación 0.2 dB/Km, dispersión de la fibra 17 ps/nm/Km incluyendo los efectos no-lineales de la fibra. Dentro del enlace óptico se incorpora un atenuador óptico variable (VOA-Variable Optical Attenuator), para simular una variación de la potencia óptica de recepción que puede darse al incrementar el número de usuarios, dentro de un rango de atenuación entre 10dB a 30dB correspondiente a una potencia de recepción -13dBm a -30dBm con el propósito de determinar el BER y el EVM.

En el lado del receptor, para la conversión de la señal óptica a una señal eléctrica se emplea un fotodiodo PIN para la detección directa y un juego de fotodiodos PIN para la detección coherente. Estas señales son procesadas por el bloque de demodulación GFDM implementados en la co-simulación para la obtención de los símbolos transmitidos. Los parámetros de configuración del fotodiodo PIN se determinan en la tabla 6-3.

Tabla 6-3: Parámetros de configuración del fotodiodo PIN

Parámetro	Valor
Resposividad [A/W]	0.8751
Dark Current [nA]	0.1
Eficiencia	0.7

Realizado por: Berenice Arguero

3.2.3 Comparación del modelo de detección directa y detección coherente

El enfoque de esta investigación será cuantitativo, ya que determinará mediante gráficas semilogarítmicas el valor de potencia de recepción que cumplan con un nivel de referencia correspondiente al conteo de errores (tomando como objetivo el conseguir un BER de 10^{-3}). Los datos recogidos del BER, EVM y la potencia de recepción serán estructurados a través de dos graficas que relaciona: el BER con la potencia de recepción y el EVM con la con la potencia de recepción para los dos esquemas propuestos.

Basándose en las curvas anteriormente mencionadas se determinará que esquema de recepción óptico propuesto obtuvo un mejor desempeño. Es decir, el esquema que requiera menor potencia de recepción para un BER de 10^{-3} . Y establecer si cumple con los parámetros establecidos en la norma UIT- G.984.2.

Se transmitió la señal GFDM empleando una modulación digital 4QAM y 16QAM por ser esquemas de modulación con una alta eficiencia espectral y alta sensibilidad al ruido. Sin embargo, estas modulaciones poseen un alto nivel de complejidad en la codificación y decodificación.

La OLT genera una longitud de onda óptica que es transmitida por la fibra óptica (SMF) de 20 Km de longitud, usando los parámetros de configuración anteriormente establecidos y en la ONU se empleará dos esquemas de detección independientemente.

En la figura 6-3 se muestra la configuración experimental para evaluar el rendimiento del receptor no-coherente en la ONU de un enlace fronthaul 5G PON a 10 Gb/s. Para este tipo de detección se utilizó un fotodiodo PIN, el cual detecta la intensidad de la señal de la portadora óptica y convierte a una señal eléctrica.

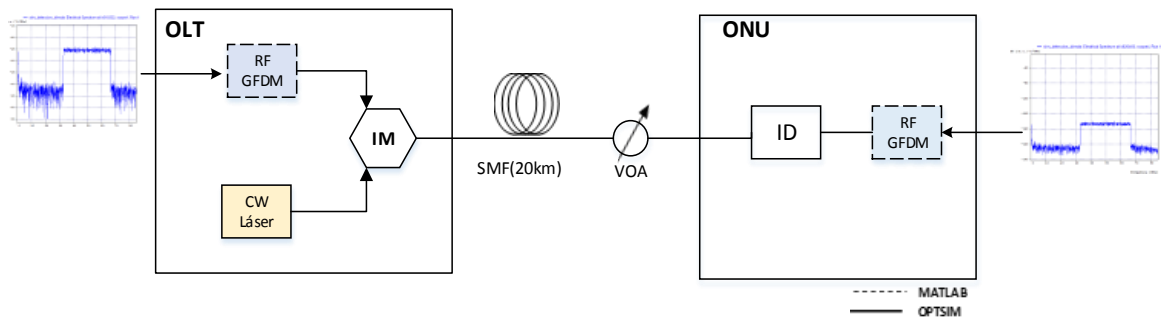


Figura 6-3 Diagrama de bloques del modelo de detección directa

Fuente: Berenice Arguero

La señal eléctrica recuperada es procesada por Matlab donde es demodulada, recuperando así los bits transmitidos. En último lugar, se varía la potencia de transmisión empleando el VOA para evaluar el desempeño de la transmisión a través de la evaluación del BER y del EVM.

Posteriormente, se configura el detector coherente en la ONU, en la figura 7-3 se muestra la configuración experimental del detector coherente homodino. El receptor utiliza un láser externo (CW) que trabaja como un oscilador local (LO- Local Oscilator) y un híbrido óptico de 90°.

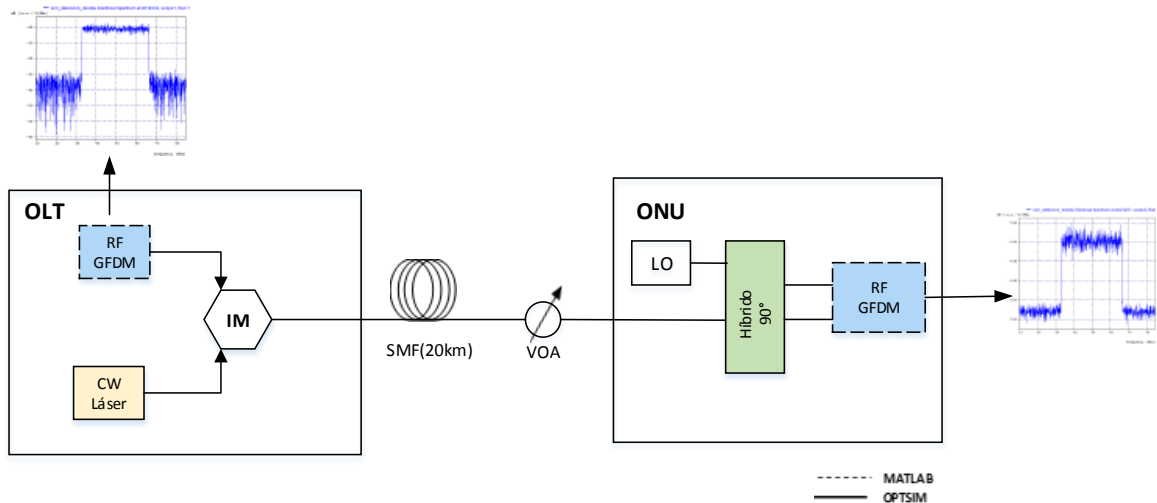


Figura 7-3 Diagrama de bloques del modelo de detección coherente

Fuente: Berenice Arguero

Se empleó la detección coherente homodina donde el desplazamiento de la frecuencia del oscilador local y de la portadora recibida se establece en cero, es decir la frecuencia del láser LO es sintonizado a la misma frecuencia del transmisor. Los valores experimentales configurados en el LO son: frecuencia del oscilador local: 193.41THz , potencia óptica: 6dBm , ancho de pulso: 10MHz . Dichos valores son exactamente iguales a los valores configurados en el transmisor.

El detector coherente híbrido de 90° está compuesto por cuatro fotodiodos PIN y un conmutador de fase ideal, donde se mezcla la señal óptica recibida y la señal de LO con un desplazamiento de 90° . Como resultado se obtiene a la salida del detector coherente dos señales de corriente que ingresan al bloque de Matlab, para realizar el post-procesamiento de la señal. En el cual se normaliza la potencia de la señal, y se cancela el ruido de ambas señales empleando el siguiente algoritmo: $I_0 = I_1^2 + I_2^2$ donde el ruido de fase se reduce mientras que la amplitud de la señal aumenta (Yao & Chen, 2017, pág. 977).

De igual forma, se varía la potencia de recepción mediante el VOA para evaluar el BER y el EVM, y observar el desempeño de la red. Dicho procedimiento se realiza con la finalidad de comparar la sensibilidad del receptor coherente respecto a la detección directa. Para finalizar, la simulación se llevó a cabo empleando la modulación 4QAM y 16QAM bajo los mismos parámetros de configuración de los esquemas de detección.

CAPÍTULO IV

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En el presente capítulo se discuten los resultados obtenidos de la comparación del conteo estadístico de errores (BER) y el EVM respecto a la potencia recibida del modelo del sistema óptico, empleado un receptor no-coherente (detección directa) y un receptor coherente.

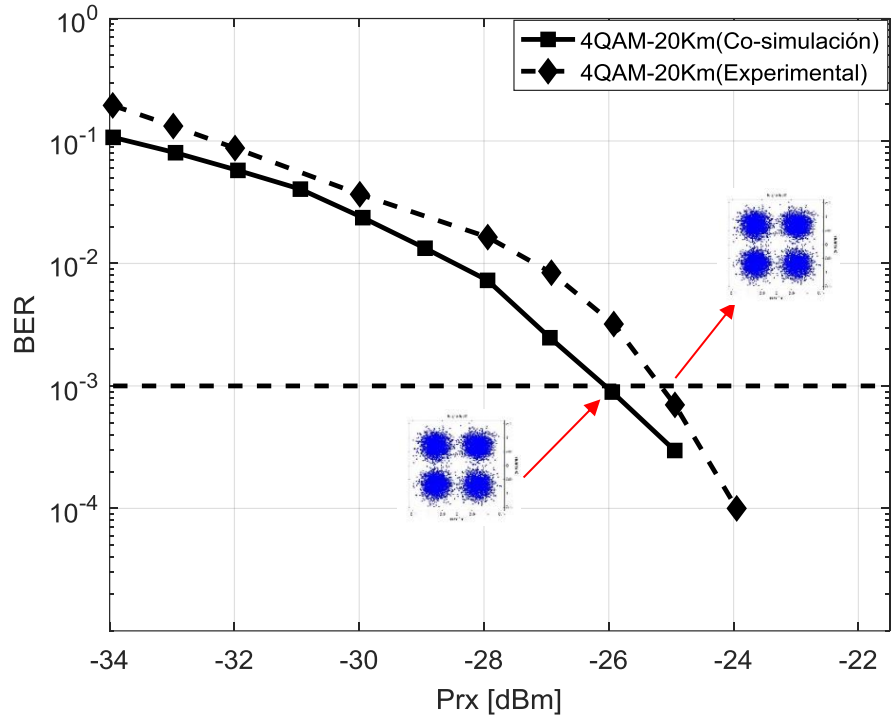
Para comparar el desempeño del receptor no-coherente y el receptor coherente en el enlace fronthaul 5G. Se evaluó la tasa de errores binario (BER- Bit Error Rate) y la magnitud del vector de error (EVM- Error Vector Magnitude) respecto a la señal recibida, para lo cual se varió la potencia de la misma mediante un VOA para determinar el BER y el EVM correspondiente.

Inicialmente, se evaluó el BER y el EVM empleando en la ONU la detección directa, luego la detección coherente y para finalizar se realizó la comparación entre estos dos sistemas de recepción óptica.

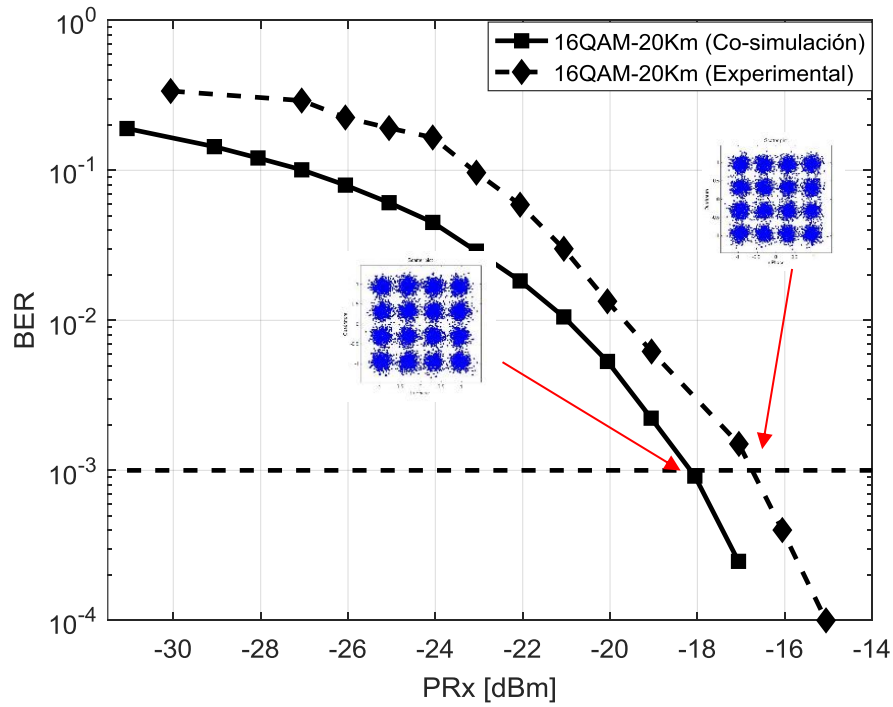
Los resultados obtenidos de la co-simulación del enlace fronthaul 5G, empleando la detección directa en la ONU para las modulaciones 4QAM y 16QAM respectivamente se muestra en la figura 1-4. Además, se incluyó los resultados obtenidos en equipos reales de laboratorio considerando las mismas configuraciones establecidas en la co-simulación con la finalidad de apoyar la investigación realizada.

La figura 1-4(a) muestra la curva BER versus potencia de recepción con la modulación 4QAM. Para un BER de 10^{-3} se midió -25dBm de sensibilidad (potencia que llega al receptor) para la parte experimental y para la co-simulación se obtuvo una sensibilidad de -26dBm. En la figura 1-4 (b) se usó la modulación 16QAM, donde se consiguió un BER de 10^{-3} , para un valor de -16 dBm de sensibilidad en el receptor para la parte experimental y de -18 dBm en la co-simulación. Del mismo modo se observa el diagrama de constelaciones correspondiente a un BER de 10^{-3} para las modulaciones correspondientes.

La diferencia entre las curvas correspondientes a la parte experimental y la co-simulación es cercana a 1 dBm debido a que no se consideró las pérdidas de inserción del modulador óptico, conectores en la co-simulación, sin embargo, existe una clara similitud entre las curvas obtenidas.



(a)



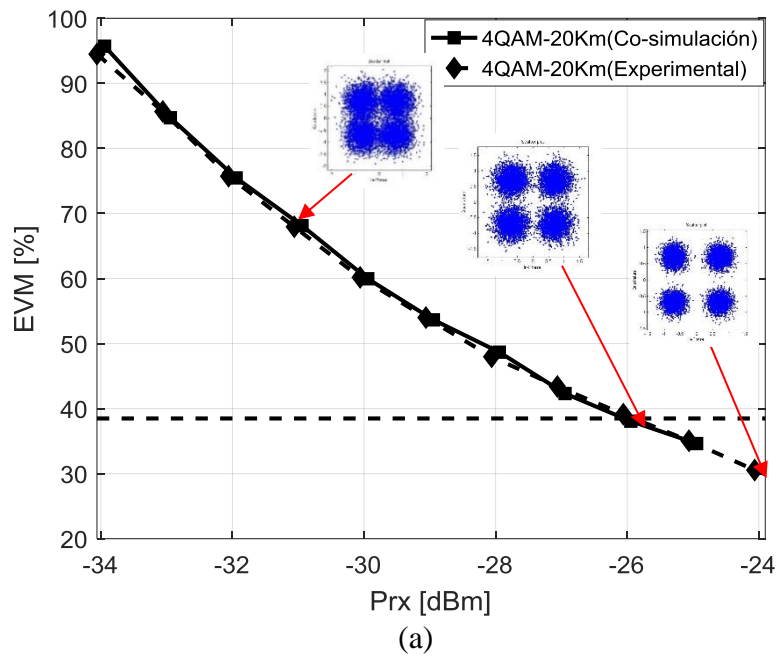
(b)

Figura 1-4 BER vs la potencia de recepción (Prx) para transmisión sobre 20Km de fibra óptica (a) modulación 4QAM y (b) modulación 16QAM.

Fuente: Berenice Arguero

Los resultados obtenidos del EVM para las modulaciones 4QAM y 16QAM para una transmisión a 10 Gb/s se muestra en la figura 2-4. La parte (a) corresponde a la gráfica del EVM respecto a la potencia recibida para 4QAM, cuyo valor de referencia esta descrita por la línea punteada en la figura. En dicha gráfica puede observarse que, considerando un BER de 10^{-3} como objetivo, mismo que corresponde a un EVM de aproximadamente 38.48% (señalado por la línea punteada en la figura), se tiene los mejores valores del EVM para una potencia en el receptor mayor a -26dBm.

Mientras que en la figura 2-4 (b) un BER de 10^{-3} , correspondiente a un EVM de 13.19% para 16QAM, se requieren al menos -15 dBm de potencia de la señal recibida. En ambas figuras se observa la degradación del diagrama de constelaciones mientras el valor del EVM aumenta para la señal 4QAM y 16QAM.



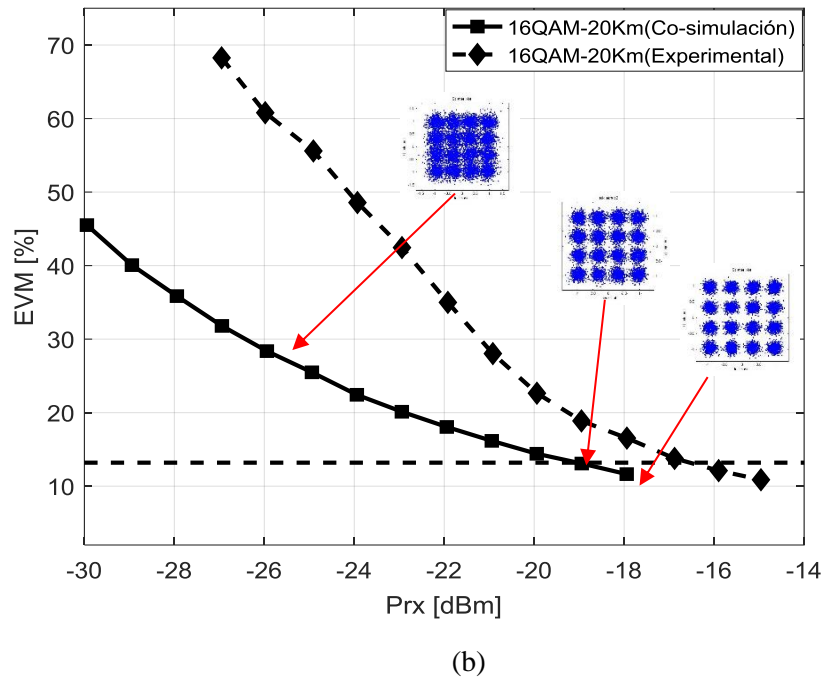


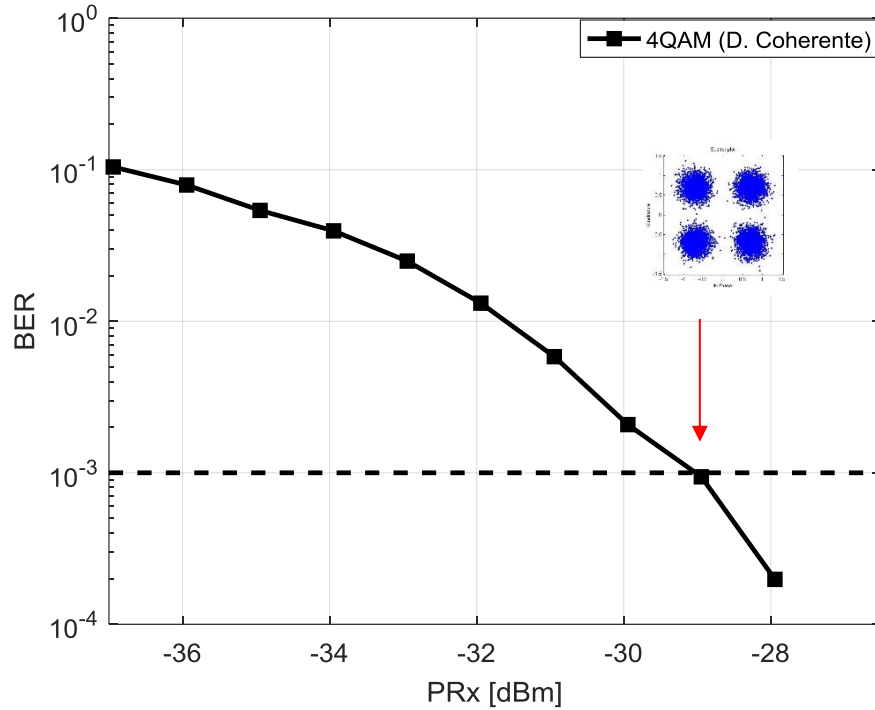
Figura 2-4 EVM [%] versus la potencia de recepción (Prx).
 (a) Modulación 4QAM, (b) modulación 16QAM.

Fuente: Berenice Arguero

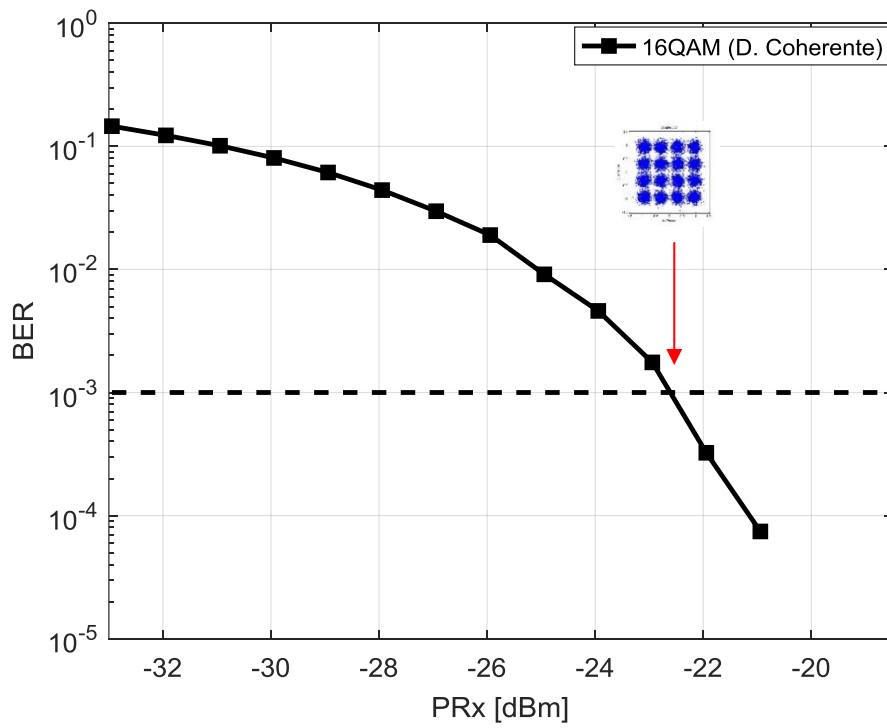
La figura 1-4 en su parte (a) y parte (b) muestran la sensibilidad del receptor propuesto para el enlace PON con detección directa usando 4QAM y 16QAM a 10 Gb/s. La diferencia entre las curvas del BER para estas modulaciones es cercana a 8dBm para un BER= 10^{-3} con una penalización de menos 4dB después de 20 Km de fibra. Se puede observar que la modulación 4QAM necesita menos potencia de recepción.

Los resultados de la simulación numérica de la transmisión de la señal GFDM empleando un receptor coherente homodino en la ONU se observa en la figura 3-4. La curva del BER respecto a la potencia de la señal recibida para la modulación 4QAM se puede ver en la figura 3-4 (a). Se midió una sensibilidad del receptor de -29dBm para un BER de 10^{-3} .

En la figura 3-4 (b) se muestran los resultados obtenidos empleando la modulación 16QAM, se consiguió un BER de 10^{-3} cerca de -23dBm de potencia en el receptor. En la misma gráfica también se observan los diagramas de constelaciones correspondiente a un BER de 10^{-3} .



(a)



(b)

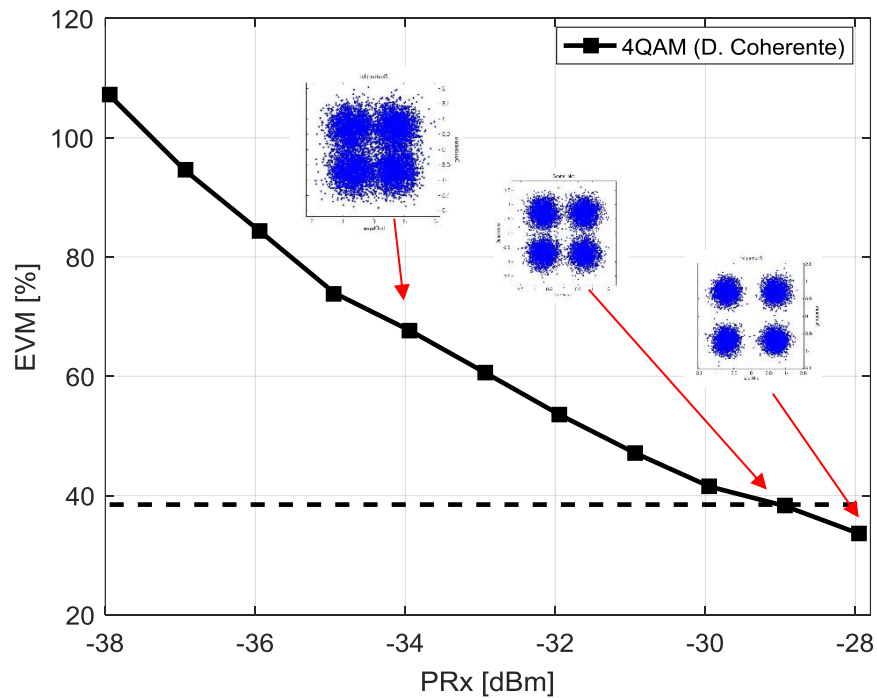
Figura 3-4 BER versus la potencia de recepción (Prx). (a) Modulación 4QAM, (b) modulación 16QAM.

Fuente: Berenice Arguero

La figura 4-4 representa la curva del EVM versus la potencia de la señal recibida empleando la detección coherente. La curva del EVM para 4QAM se puede ver en la figura 4-4 (a) donde el EVM toma el valor de 38.48%, correspondiente a un BER de 10^{-3} , limitado por la línea punteada en la gráfica. Se puede observar que dicho el EVM y BER referidos se obtienen para cuando en el recetor arriba una señal con potencia de al menos -22.5dBm.

En la figura 4-4 (b) se observa el desempeño de la transmisión utilizando la modulación 16QAM. Se observa que para un BER de 10^{-3} , que corresponde a un EVM de aproximadamente 13.19% , se requiere una señal en el receptor con potencia de al menos -23 dBm.

De la figura 3-4 (a) ,(b) se determina que la diferencia entre las curvas del BER para las modulaciones 4QAM y 16QAM correspondiente a un BER= 10^{-3} es cercano a 5dBm con una penalización de menos 4dB después de 20 Km de fibra.. Comprobando que la modulación 4QAM necesita menos potencia de recepción.



(a)

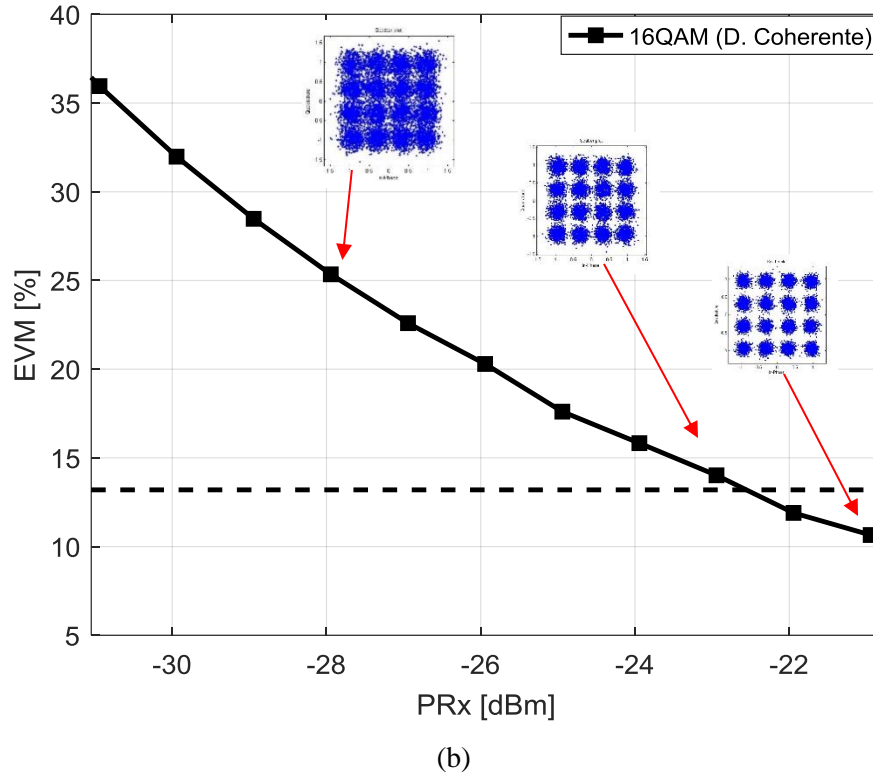


Figura 4-4 EVM [%] versus la potencia de recepción empleado la detección coherente. (a) Modulación 4QAM (b) modulación 16QAM
Fuente: Berenice Arguero

4.1 Comparación entre detección directa y detección coherente

Al comparar las curvas del BER y del EVM de la detección coherente y de la detección directa para la modulación 4QAM en un enlace PON a 10 Gb/s con 20 km de fibra óptica, se obtuvo los resultados que se muestran en la figura 5-4.

La curva del BER se presenta en la figura 5-4 (a), se obtuvo un BER bajo de 10^{-4} en el desempeño de los receptores ópticos. Sin embargo hay un desplazamiento hacia la izquierda de las curvas del BER aproximadamente de -3dBm en la sensibilidad del receptor para un BER de 10^{-3} entre el receptor coherente y el receptor no-coherente. Esto se debe a la combinación de la señal recibida y la potencia del LO en el híbrido de 90° , sumando el post-procesamiento de la señal.

De la misma manera el rendimiento de la red, medida a través del EVM, para 4QAM se puede observar en la figura 5-4 (b) donde se muestra que la potencia de recepción para el detector coherente debe ser de al menos -29dBm, lo cual significa una mejora de 3 dB con respecto a la transmisión con detección directa, donde se requieren al menos -26dBm en el receptor para lograr el EVM objetivo.

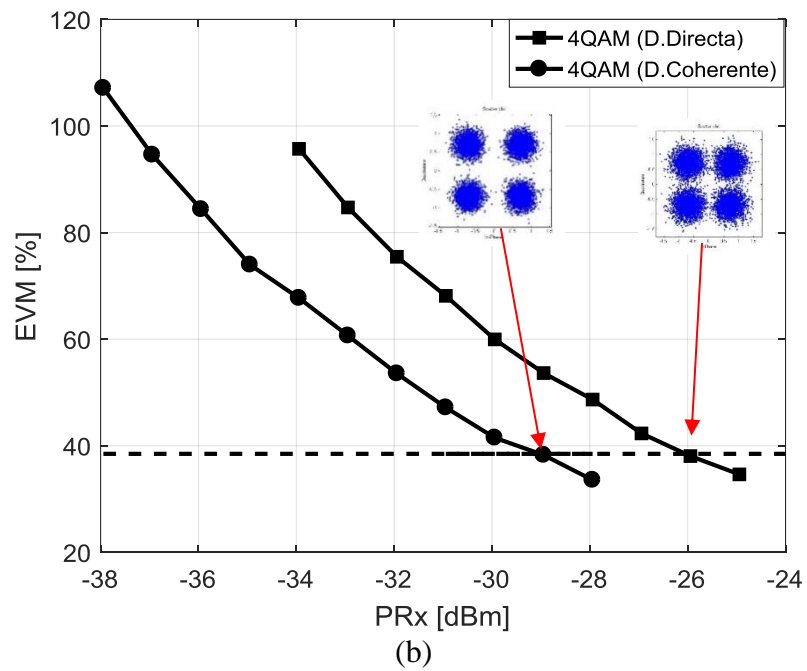
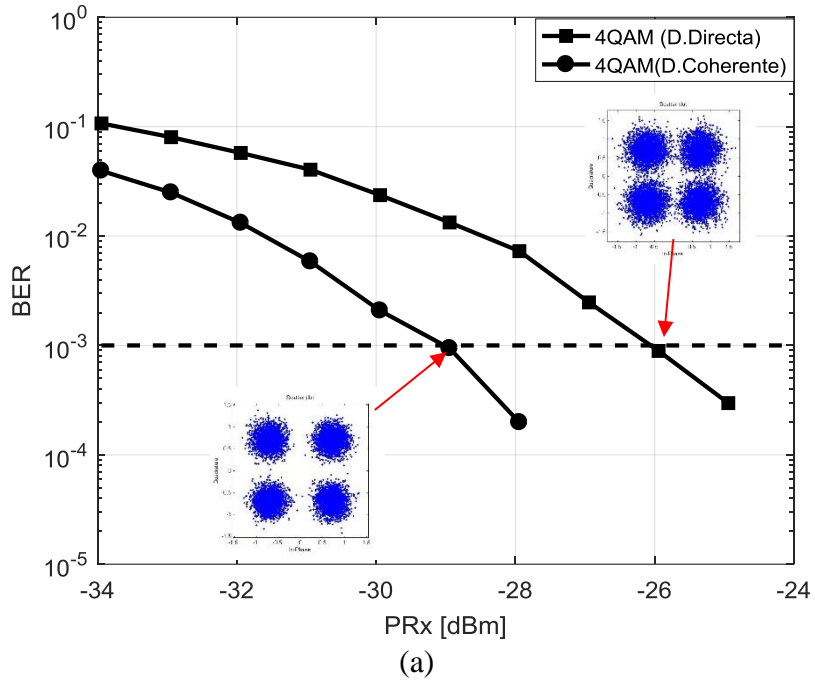
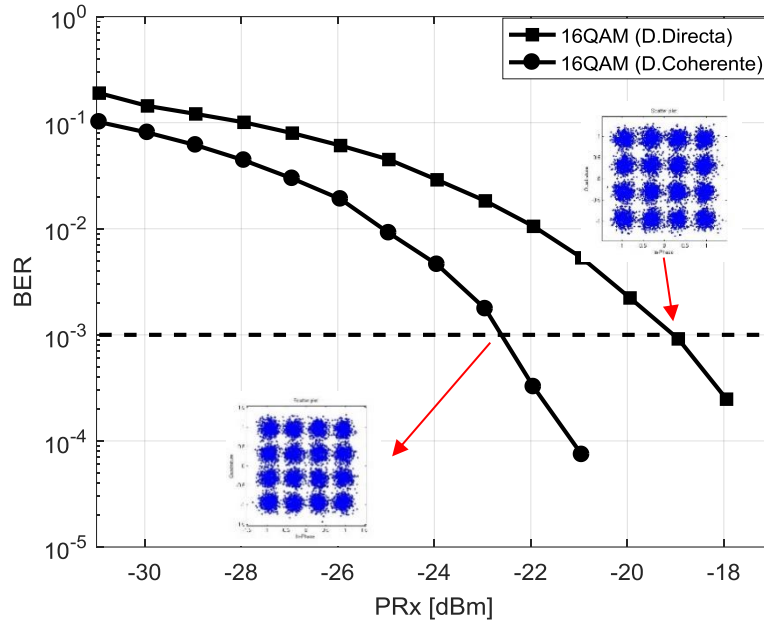


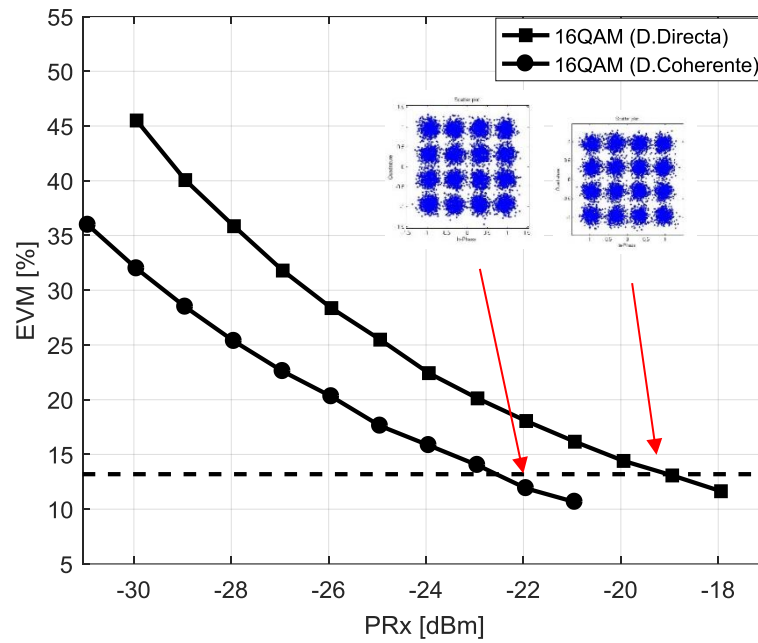
Figura 5-4 (a) BER versus Potencia de recepción. (b) EVM versus Potencia de recepción.

Fuente: Berenice Arguero

De igual manera se comparó las curvas de BER y EVM en función de la potencia de recepción para la señal 16QAM. Los resultados se presentan en la figura 6-4. Puede observarse en la figura que la máxima capacidad en la sensibilidad del receptor se obtiene empleando el detector coherente.



(a)



(b)

Figura 6-4 (a) BER versus Potencia de recepción, (b) EVM versus Potencia de recepción.

Fuente: Berenice Arguero

Para un BER de 10^{-3} , la sensibilidad requerida en el receptor es de alrededor de -23dBm utilizando detección coherente y -19dBm usando detección directa, lo que significa una diferencia de 4dB como

se observa en la figura 6-4 (a). En la curva del EVM vs potencia en el receptor que se muestra en la figura 6-4(b), se observan resultados similares.

La tabla 1-4 muestra una comparación entre los detectores ópticos, considerando la sensibilidad del receptor para un BER de 10^{-3} , donde se evidencia un mejor rendimiento en el detector coherente ya que necesita menos potencia en el receptor. Nótese que la penalidad del receptor no coherente al respecto del coherente es de 3 dB (esto es, se necesitan 3 dB más de potencia en el receptor no coherente para lograr el mismo BER en comparación al receptor coherente).

Tabla 1-4: Comparación numérica de los detectores ópticos

Características	Detector no-coherente	Detector coherente	Penalidad
Sensibilidad del receptor para 4 QAM (BER de 10^{-3})	-26 dBm	-29 dBm	3 dB
Sensibilidad del receptor para 16 QAM (BER de 10^{-3})	-19 dBm	-22 dBm	3 dB

Realizado por: Berenice Arguero

Es pertinente resaltar, que se obtuvo un mejor rendimiento, de la transmisión en el enlace fronthaul óptico 5G, al emplear un detector coherente ya que se logra el BER objetivo de 10^{-3} con un menor valor de potencia recibida (alrededor de -29dBm). Para el análisis se considera un valor de pérdidas en la fibra óptica de 0.2 Km/dB en 20 Km para la señal GFDM. Esto indica la superioridad del receptor coherente propuesto bajo el esquema de modulación 4QAM y 16QAM en términos de la potencia recibida de la señal.

4.2 Comprobación de Hipótesis

Para comprobar si se debe aceptar la hipótesis los resultados obtenidos serán sometidos a la prueba estadística chi cuadrada χ^2 . La misma que permite determinar si existe una relación entre dos variables categóricas sin importar su nivel de relación (Universidad Nacional Autónoma de México, 2016).

Para la prueba de independencia de los eventos relacionados se parte de la hipótesis alternativa y la hipótesis nula mencionadas a continuación:

- H(i): Habrá diferencia significativa entre la sensibilidad del receptor no-coherente y la sensibilidad del receptor coherente al transmitir la señal GFDM sobre 20 km de fibra a 10Gb/s.
- H(o): No habrá diferencia significativa entre la sensibilidad del receptor no-coherente y la sensibilidad del receptor coherente al transmitir la señal GFDM sobre 20km de fibra a 10Gb/s.

Al ser la sensibilidad de receptor una variable continua se hizo la medición de 50 transmisiones de datos usando en todas ellas siempre un valor objetivo de BER de 10^{-3} . Como se observa en la tabla 2-4, para el receptor no-coherente se obtuvo un valor medio de -26.2dBm ($2.51189 * 10^{-6}$ W) correspondiente a la potencia recibida mínima necesaria para alcanzar un BER de 10^{-3} , en la tabla 3-4, para el receptor coherente se tiene una media de -29.2 dBm ($1,25893 * 10^{-6}$ W) para obtener el referido BER.

Tabla 2-4: Valor de la sensibilidad (dBm) requerida en el receptor no-coherente para un BER 10^{-3}

X_i	-26,1	-26,5	-26,1	-26,1	-26,4	-26,2	-26,4	-26,2	-26,1	-26
	-26,3	-26,2	-26,2	-26,3	-26	-26,2	-26,4	-26,3	-26,1	-26,1
	-26	-26	-26,2	-26,3	-26,4	-26,3	-26,1	-26,3	-26,1	-26,1
	-26	-26,1	-26,1	-26,1	-26,2	-26,2	-26,1	-26,1	-26,4	-26,4
	-26,3	-26,1	-26,1	-26	-26,5	-26,4	-26,2	-26	-26,4	-26,3
\bar{X}	-26.2									
σ	0,142828569									

Realizado por: Berenice Arguero

Tabla 3-4: Valor de la sensibilidad (en dBm) requerida en el receptor coherente para un BER= 10^{-3}

X_i	-29,2	-29	-29,5	-29,5	-29,2	-29,2	-29,2	-29,5	-29,2	-29,1
	-29,4	-29,2	-29,1	-29,2	-29	-29,1	-29,5	-29,5	-29,3	-29
	-29,1	-29,2	-29,4	-29	-29	-29,1	-29,3	-29,4	-29,3	-29,2
	-29,3	-29,1	-29,4	-29,1	-29,3	-29,1	-29,2	-29,3	-29,4	-29
	-29,5	-29,4	-29,2	-29,2	-29,2	-29,2	-29,3	-29,3	-29,4	-29,4
\bar{X}	-29,2									
σ	0,15252541									

Realizado por: Berenice Arguero

Los datos obtenidos mediante la co-simulación, se ordenan en la tabla 4-4 los cuales representan las frecuencias observadas para cada una de las categorías de la detección óptica y su nivel de respuesta

(sensibilidad del receptor), considerando el valor de sensibilidad mínimo de -26dBm de la norma UIT-G948.2 para un total de 100 transmisiones de la señal GFDM.

Tabla 4-4: Tabla de frecuencias observadas para un valor de referencia de un BER=10⁻³

Detección óptica	Sensibilidad del receptor		Total frecuencia marginal (fila)
	Igual	Mejor	
No-coherente	40	10	50
Coherente	0	50	50
Total frecuencia marginales(columna)	40	60	100

Realizado por: Berenice Arguero

En la tabla 5-4 se calcularon las frecuencias estimadas de cada categoría para cada una de las frecuencias observadas mediante la ecuación 1-4. Dicho valor, es el que se esperaría si la respuesta (sensibilidad del receptor) no dependiera del detector óptico que se emplee.

$$F_{estimada} = \frac{\text{Total frecuencia marginales(columna)} * \text{Total frecuencia marginal (fila)}}{\text{Total global}} \quad (1-4)$$

Tabla 5-4: Tabla de frecuencias estimadas para un valor de referencia de un BER=10⁻³

Detección óptica	Sensibilidad del receptor		Total
	Igual	Mejor	
No-coherente	20	30	50
Coherente	20	30	50
Total	40	60	100

Realizado por: Berenice Arguero

Para evaluar el nivel de discrepancia entre la frecuencia observada y la frecuencia estimada se calcula la diferencia entre las magnitudes para cada una de las casillas, siguiendo la distribución de

probabilidad chi-cuadrado. Con la ecuación 1-4 (Fuentes, 2017, págs. 1-3) se calculó el valor de chi cuadrada, obteniendo como valor 66,66.

$$X_{calculado}^2 = \sum \frac{(Frecuencia\ Observado - Frecuencia\ Estimado)^2}{Frecuencia\ Estimado} \quad (1-4)$$

El valor obtenido es ajustando a un valor teórico con un margen de error o nivel de confianza y grados de libertad el cual está relacionado con el número de filas y columnas de la tabla. Donde se encontrará un punto crítico ($X_{teorico}^2$) que se comparará con el valor calculado. Si el valor calculado supera al valor teórico de la tabla se rechaza la hipótesis nula (H_0) es decir se rechazaría la independencia de las variables (Galindo, 2013).

Para determinar el valor teórico se fijó un nivel de confianza de 5% correspondiente a 0,05 con un grado de libertad y la intersección de estos dos valores en la tabla de valores de chi-cuadrado corresponde un valor de 3,84.

El valor calculado es mayor al valor teórico ($66,66 > 3,84$) por lo tanto la respuesta de la sensibilidad del receptor depende el detector óptico que se emplee. Es decir, si hay una diferencia significativa en la sensibilidad del receptor al usar una detección coherente de 3dB respecto al detector no-coherente.

Además, cabe recalcar que los resultados obtenidos de la experimentación para el detector no-coherente y coherente cumplen con la especificación de la sensibilidad mínima requerida en la ONU de -26dBm establecido en norma UIT- G.948.2. Como se puede evidenciar en la tabla 6-4.

Tabla 6-4: Comparación de la sensibilidad del receptor experimental con la norma UIT G.948.2

Características	Detector no-coherente	Detector coherente	Penalidad de la DD con respecto a la recepción coherente	Especificación UIT G.984.2 (sensibilidad mínima para PON Clase C)
Sensibilidad del receptor para 4 QAM (BER de 10^{-3})	-26 dBm	-29 dBm	3 dB	-26 dBm
Sensibilidad del receptor para 16 QAM (BER de 10^{-3})	-19 dBm	-22 dBm	3 dB	-26 dBm

Realizado por: Berenice Arguero

CAPITULO V

5. PROPUESTA DE INVESTIGACION INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo se discuten la propuesta de investigación, se especifica la arquitectura del sistema de transmisión óptico de la red de acceso entre la OLT y la ONU, los parámetros de configuración para la forma de onda GFDM de la red inalámbrica 5G.

El enfoque cuantitativo se fundamentó en el análisis comparativo del desempeño de receptores ópticos coherentes y no coherentes para GFDM en redes PON. Se ha demostrado el uso de la señal GFDM como una forma de onda efectiva para ser empleada en fronthauling para 5G a 10 Gb/s, a una distancia de 20 Km, empleando fibra óptica monomodo estándar. Tanto para una detección no-coherente (detección directa de intensidad) como para una detección coherente, el objetivo de la transmisión fue igualar o superar un BER de 10^{-3} .

La propuesta de investigación tiene correspondencia con las líneas de investigación en comunicaciones móviles y en diseño de redes de comunicación en: el análisis y estudio de los principios de radiocomunicaciones, tecnologías usadas en sistemas móviles celulares, y el empleo de nuevos modelos de metodologías en tecnologías ya existentes para desarrollar un adecuado diseño de una red de comunicaciones.

5.1 Título de la Propuesta

Sistema de transmisión coherente para redes ópticas pasivas (PON) empleando GFDM en redes 5G.

5.2 Antecedentes de la Propuesta

El desafío de hoy en día es aumentar la capacidad de los sistemas ópticos, que no solo requieren alta velocidad sino buscan la flexibilidad de adaptarse a otras tecnologías existentes, así como a la creciente demanda de tráfico por parte de los usuarios. El incremento del rendimiento de las redes de acceso basadas en redes ópticas pasivas (PON) se encuentran en constante desarrollo. Dentro de este campo se han realizado varias investigaciones, que buscan incrementar el rendimiento de las redes

PON, enfocadas en la implementación de redes UDWDM-PON utilizando técnicas de transmisión y recepción coherente en conjunto con formatos avanzados de modulación en el dominio óptico y con el procesamiento digital de señales (Kawamura, 2016).

Varios trabajos de investigación muestran las ventajas de la transmisión coherente en términos de un alto rendimiento y alta sensibilidad en el receptor en PON (Chao, Hongwei, Minghua, & Shizhong, 2011) propone una red UDWDM-PON coherente que emplea un receptor heterodino de 64 canales a 10 Gb/s sobre 25km de fibra óptica SMF, soportando un ancho de banda simétrico de 1 Gb/s por usuario, donde la sensibilidad del receptor aumenta en gran medida con lo que se incrementa a su vez la distancia de transmisión y el número de usuarios.

Dentro de esta línea se han realizado varias investigaciones, que buscan incrementar el rendimiento de las redes PON, enfocadas en la implementación de nuevas tecnologías. Por tal motivo, el estudio comparativo del desempeño de los receptores ópticos realizados mediante una co-simulación indica de manera cuantitativa y cualitativa que se obtuvo un mejor desempeño empleando un receptor coherente. Sin embargo, el receptor óptico coherente es un sistema más complejo compuesto de elementos ópticos y electrónicos de alto rendimiento, por lo que tiene un alto costo en relación a los transceptores tradicionales de transmisión-detección directa de intensidad. Con las ventajas que este receptor presenta se podría establecer un análisis de costo-beneficio para su futura implementación dentro del enlace fronthaul 5G (Fifth Generation Forum, 2016).

5.3 Objetivos

5.3.1 General

Establecer valores de potencia óptica que cumplen con el estándar para redes PON con BER, EVM adecuado para la transmisión de GFDM, utilizando receptores ópticos coherentes.

5.3.2 Específicos

- Implementar un sistema de transmisión de GFDM en redes PON con detección coherente mediante simulación numérica.
- Analizar el desempeño de la transmisión GFDM en una red PON con detección coherentes y no coherentes respecto al EVM y la potencia de entrada de radio frecuencia.

5.4 Justificación

La tecnología 5G aún sigue en estudio por lo que está pendiente aún la maduración de los estándares aplicables a la misma. Algunas propuestas se han dado a partir de las especificaciones LTE-Advanced Pro (Third Generation Partnership Project, 2018) sin embargo estos estándares no estarán probablemente disponibles sino hasta 2020. La evolución de la transmisión de señales de radio inalámbricas directamente sobre la fibra óptica está en auge, por lo que el estudio realizado en esta investigación demuestra la factibilidad de utilizar una infraestructura PON como enlace fronthaul de la arquitectura inalámbrica 5G, usando la forma de onda GFDM, empleando en el lado del receptor una detección no-coherente y coherente y cumpliendo con el estándar UIT- G.948.2 para redes PON con capacidad de gigabits (GPON) (Muñoz, 2017).

El empleo de la fibra óptica se hace necesario debido a su baja atenuación comparando con los sistemas inalámbricos. Al emplear un sistema de transmisión coherente compensa la degradación de la señal producida por la dispersión y la no-linealidad de la fibra, convirtiéndolo en un sistema óptico robusto ya que mejora la sensibilidad del receptor. Sin embargo, al requerir más componentes ópticos es una opción costosa, por lo que se prefiere sistemas de detección no coherente que reducen ostensiblemente su costo, pero que tienen una menor sensibilidad del receptor.

Esta propuesta de investigación propone evaluar el desempeño de GFDM como esquema de modulación multiportadora en un sistema de comunicación óptica de acceso con receptores ópticos coherentes y no-coherentes en redes PON encontrando valores adecuados de funcionamiento de GFDM en una red óptica con receptores coherentes y no coherentes en redes PON para la nueva generación de tecnología inalámbrica 5G contribuyendo a mejorar los servicios y aplicaciones como IoT, video streaming de alta velocidad y realidad aumentada (The 5G Infrastructure Public Private Partnership, 2014).

5.5 Propuesta

Establecer valores de potencia óptica que cumplen con el estándar para redes PON y un EVM adecuado para la transmisión de GFDM, utilizando receptores ópticos coherentes a 10 Gb/s.

5.5.1 Modelo del sistema óptico propuesto

Los lineamientos para la arquitectura del sistema de transmisión óptico propuesto de la red de acceso entre la OLT y la ONU se observa en la figura 1-5. El sentido de la transmisión se define de la

siguiente manera: para el enlace descendente, la señal será transmitida de la OLT hacia la ONU y para el enlace ascendente la señal se transmitirá desde la ONU a la OLT. Acogiéndose a la transmisión bidireccional utilizando la técnica de multiplexación por división de longitud de onda (WDM, wavelength division multiplexing) (International Telecommunication Union, 2016).

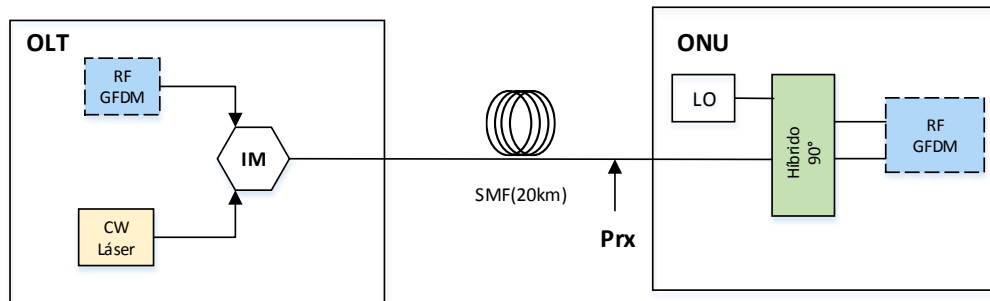


Figura 1-5 Arquitectura del sistema de transmisión óptica
Realizado por: Berenice Arguero

La sensibilidad de la ONU se midió en la interface física Prx de la 1-5. Empleando un receptor coherente homodino. La solución de implementar una detección coherente como un receptor de alto desempeño, permite incrementar el rendimiento de la red de fronthaul en la red 5G.

5.5.2 Tipo de fibra

Debe utilizarse fibra monomodo conforme a la Recomendación G.652 (International Telecommunication Union, 2016).

5.5.3 Longitud de Onda

Las longitudes de onda de funcionamiento utilizadas en el enlace óptico estarán en la ventana segunda y tercera ventana de 1310 nm y de 1550 nm respectivamente. Sin embargo, en el trabajo con la tercera ventana (International Telecommunication Union, 2015).

5.5.4 Especificación de la OLT

Establece una interfaz óptica con la red de distribución óptica (ODN), siendo el transmisor. Teniendo en consideración la potencia óptica inyectada mínima es de 6 dBm correspondiente a la Clase C.

5.5.5 Especificación de la ONU

La ONU es una interfaz óptica en el lado del receptor. Empleando una configuración de detección coherente homodina. Formando por un acoplador denominado “híbrido de 90°” (juego de fotodiodos), un oscilador local, elementos ópticos y electrónicos de alto rendimiento debido a que combina un acoplador 2x2 con un desfasador de 90°, donde se combina la señal de entrada y la señal del oscilador local.

A continuación, se presenta las especificaciones ópticas de la OLT y la ONU se encuentran en la tabla 1-5, mismas que se contrastan con los niveles medidos acorde a lo que se muestra en la figura 1-5, en el enlace descendente, tomando como referencia una ODN clase C. Los valores de los parámetros especificados corresponden a condiciones normales de funcionamiento, considerando una fibra monomodo G652.D, incluyendo los factores de la fibra como: la atenuación, la dispersión y los efectos no lineales de la misma. Estos valores fueron establecidos en la investigación para alcanzar el objetivo de diseño de la sección óptica con una tasa de errores en los bits mejor que 1×10^{-10} (luego del uso de FEC) para el caso extremo de condiciones de atenuación y dispersión del trayecto óptico según la norma UIT-982 (International Telecommunication Union, 2009).

Tabla 1-5: Especificaciones de la OLT y ONU

Elemento	Unidad	Especificación
Tipo de fibra	-	Rec. UIT-T G.652
Modulación	-	4QAM-16QAM
Forma de onda 5G	-	GFDM
Tipo de receptor óptico	-	Coherente Homodino
Gama de atenuación (Rec. UIT-T G.982)	dB	Clase C: 15-30
Máximo alcance lógico	km	60
Máximo alcance lógico diferencial	km	20
OLT		
Potencia media inyectada	dBm	Clase C: 6
ONU		
Sensibilidad mínima (4QAM)	dBm	Clase C: -29
Sensibilidad mínima (16QAM)	dBm	Clase C: -22

Realizado por: Berenice Arguero

CONCLUSIONES

- En la presente investigación, a través de una co-simulación empleando el software OptSim y Matlab, se comparó el desempeño de una red PON basada en modulación de intensidad detección directa y basada en transmisión-detección coherente. Se emplearon los parámetros correspondientes a un enlace de fronthaul de una red móvil 5G. Los resultados numéricos muestran un mejor desempeño del receptor coherente en la detección de la señal GFDM/4QAM-16QAM, transmitida a 10 Gb/s a lo largo de un enlace de 20 Km de fibra SMF G.652D.
- La configuración del enlace propuesto para los receptores ópticos, empleando la modulación 4QAM para la señal GFDM, cumple con el estándar G.948.2 en el cual se especifica que la máxima potencia óptica inyectada en la OLT debe ser igual o menor a 6 dBm y que el presupuesto de pérdidas de potencia de la ODN debe soportar hasta 30 dB, lo que significaría una potencia recibida en la ONU de -26 dBm. Los dos parámetros antes mencionados se cumplen satisfactoriamente como puede comprobarse en los resultados obtenidos en el presente trabajo de investigación.
- Los resultados indican una superioridad del detector coherente respecto al detector no-coherente cercana a 3 dB en la sensibilidad del receptor. Dentro de esta perspectiva se avizora que la detección coherente permitirá incrementar la capacidad de las redes ópticas fronthaul. Sin embargo, la mayor complejidad de una red óptica coherente sugiere que su implementación sería muy costosa a menos que a futuro se logren desarrollos de bajo costo para los componentes de este tipo de redes.
- Para los dos esquemas de modulación propuestos, utilizando tanto detección directa (no-coherente) como la detección coherente se alcanzó un BER por debajo de 10^{-4} , superando el BER límite que permite una corrección de errores (FEC), mismo que corresponde a un BER de 10^{-3} . Específicamente se pudo obtener valores de EVM igual o menor al 38.48% para 4QAM e igual o menor al 13.19% para 16 QAM, mismos que corresponden a los mayores valores de EVM permitidos con el fin de tener la capacidad de realizar FEC.
- De acuerdo a los resultados obtenidos se comprobó que la modulación 4 QAM requiere menos potencia en el receptor en comparación a la 16 QAM, lo cual se debe a que la primera es menos propensa a la degradación por inserción de distorsión y ruido en el canal en comparación a la segunda. Las curvas del BER para 4 QAM y 16 QAM demuestran que la penalidad por utilizar la modulación 16 QAM en lugar de la 4 QAM es de 8 dB al utilizar detección directa y 5 dB al utilizar detección coherente. Sin embargo, se debe tomar en cuenta que la modulación 16 QAM

es capaz de transportar el doble de información que la 4QAM, por lo que la relación “cantidad de información vs penalidad en la sensibilidad del receptor” es más satisfactoria en un sistema coherente.

RECOMENDACIONES

- Dados los antecedentes de esta investigación, debido a que únicamente se consideró dos esquemas de modulación para la señal GFDM, se recomienda llevar a cabo otros estudios que tomen en cuenta diferentes esquemas de modulación potencialmente empleables, como Q-PSK, DP-BPSK, además emplear otro tipo de formas de onda que se proyectan como alternativas a OFDM, tales como FBMC y UFMC.
- También se puede realizar una futura investigación con diferentes sistemas de detección coherente, entre los que se puede mencionar, la detección heterodina, intradina lo cual puede contribuir a mejorar la señal recibida.
- Este problema merece investigación adicional en el post-procesamiento que requiere la señal para mejorar el sistema empleando los dos esquemas propuestos. Las ventajas del detector coherente son evidentes y realizar un post-procesamiento incrementaría su rendimiento. Adicionalmente se podría realizar estudios de pre-compensación y post-compensación de la dispersión introducida en la señal por la propagación de la misma en la fibra óptica.

BIBLIOGRAFÍA

- Agrawal, G.** (2010). *Fiber-Optic Communication Systems* (Vol. Fourth Edition). (C. Kai, Ed.) Rochester, New York: John Wiley & Sons, Inc., Publication.
- Alvarez, J.** (2015). Impacto de los efectos lineales y no lineales en el requerimiento del ancho de línea del transmisor en sistemas WDM-DPSK. *UIS Ingenierías*, 14(2), 35–45.
- Alzate, D.** (2011). Retos en la transmisión de 40/100Gb/s sobre fibra óptica. *Telecomunicaciones e Informática*, 1(2), 23-60.
- Anritsu Corporation.** (2017). The New updated 80 Page Understanding 5g Guide. Retrieved from <https://pages.anritsu-emearesponse.com/Understanding-5G-Guide.html>
- Barros, D., & Kahn, J.** (2008). Coherent detection in optical fiber systems. *Opt. Express* 16, Vol. 16(2), 753-791.
- Bennett, G., Wu, k., Malik, A., & Awadalla, A.** (2014). A review of high-speed coherent transmission technologies for long-haul DWDM transmission at 100g and beyond. *IEEE Communications Magazine*, 52(10), 102-110.
- Bindhaiq, S., & Zulkifli, N.** (2014). 80-Gb/s wavelength stacked time and wavelength division multiplexing-passive optical network for the next generation-pon second stage. *International Conference on Photonics (ICP)*, 69-71. doi:10.1109/ICP.2014.7002313
- Browning, C.** (2017). 5G wireless and wired convergence in a passive optical network using UF-OFDM and GFDM. *IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops)*, 386-392.
- Chao, H., Hongwei, C., Minghua, C., & Shizhong, X.** (2011). 64 channels 1Gbit/s ultra-dense Wdm Pon system based on coherent heterodyne receiver. *Proceedings of 2011 International Conference on Electronics and Optoelectronics*, V2-34-V2-37. doi:10.1109/ICEOE.2011.6013167
- Conectrónica.** (2016, Febrero). Tecnología y elementos de conexión y conectividad. Retrieved 2017, from <http://www.conectronica.com/wireless/redes-wireless/fronthaul-backhaul-movil>
- Conference Proceedings.** (2004). Physical Layer Performance Testing the Bit Error Ratio (BER).
- Dong, Z., Chien, H., Yu, J., Zhang, J., & Cheng, L.** (2015). Very-High-Throughput Coherent Ultradense WDM-PON Based on Nyquist-ISB Modulation. *IEEE Photonics Technology Letters*, 27(7), 763-766. doi:10.1109/LPT.2015.2391281
- Doufexi, A., & Nix, A.** (2016). System level 5g evaluation of Gfdm waveforms in an Lte-A platform. *2016 International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS)*, 335-340.

- Fifth Generation Forum.** (2016). 5G Vision, Requirements, and Enabling Technologies. Retrieved from https://www.zte.com.cn/global/about/magazine/zte-communications/2015/1/en_202/432740
- Fiorani, M., Tombaz, S, Martensson, J., & Monti, P.** (2016). Modeling energy performance of C-RAN with optical transport in 5G network scenarios. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, 8(11), B21-B34.
- Fuentes, S.** (2017). Universidad Autónoma de Madrid. Retrieved from <http://www.fuenterrebollo.com/Aeronautica2016/contingencia.pdf>
- Galindo, M.** (2013, noviembre). Análisis de la relación entre dos variables cualitativas: Test Chi cuadrado. Módulo 4. Retrieved mayo 20, 2018, from <http://diarium.usal.es/mooc/estadisti>
- Gaudino, R.** (2016). Current trends in Optical Access Networks. 236.
- Hajjian, Z., & Pandong, L.** (2016). Spectral Efficiency Analysis of Filter Bank Multi-Carrier (FBMC)- Based 5G Networks with Estimated Channel State Information (CSI). doi:10.5772/66057
- Hernández, R., Fernández, C., & Baptist, M.** (2017). Metodología de la Investigación. México: Interamericana editores.
- IEEE.** (2015). IEEE 100G-EPON Task Force. Retrieved from Physical Layer Specifications and Management Parameters for 25 Gb/s, 50 Gb/s, and 100 Gb/s Passive Optical Networks: <https://mentor.ieee.org/802-ec/dcn/15/ec-15-0100-00-ACSD-802-3ca.pdf>
- International Telecommunication Union.** (2005, Julio). UIT. Retrieved from UIT-T Rec. G.984.3 Enmienda 1 (07/2005) - ITU: https://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=e&id=T-REC-G.984.3.
- International Telecommunication Union.** (2009). IUT. Retrieved Agosto 14, 2017, from Optical fibres cables and systems: https://www.itu.int/dms_pub/itu-t/opb/hdb/T-HDB-OUT.10-2009-1-PDF-E.pdf
- International Telecommunication Union.** (2015). ITU. Retrieved 2017, from Telecommunication Standardization Sector of ITU: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.989.1-201303-I/es>
- International Telecommunication Union.** (2016). Recommendation ITU-T G.652. Retrieved from www.itu.int
- Kawamura, A.** (2016). Redes Ópticas Pásivas . Retrieved from https://www.bicsi.org/uploadedFiles/BICSI_Website/Global_Community/Presentations/CA/LA/Kawamura_Redex_Colombia_2016.pdf
- MathWorks.** (2018). Matlab. Retrieved from <https://es.mathworks.com/products/matlab.html>

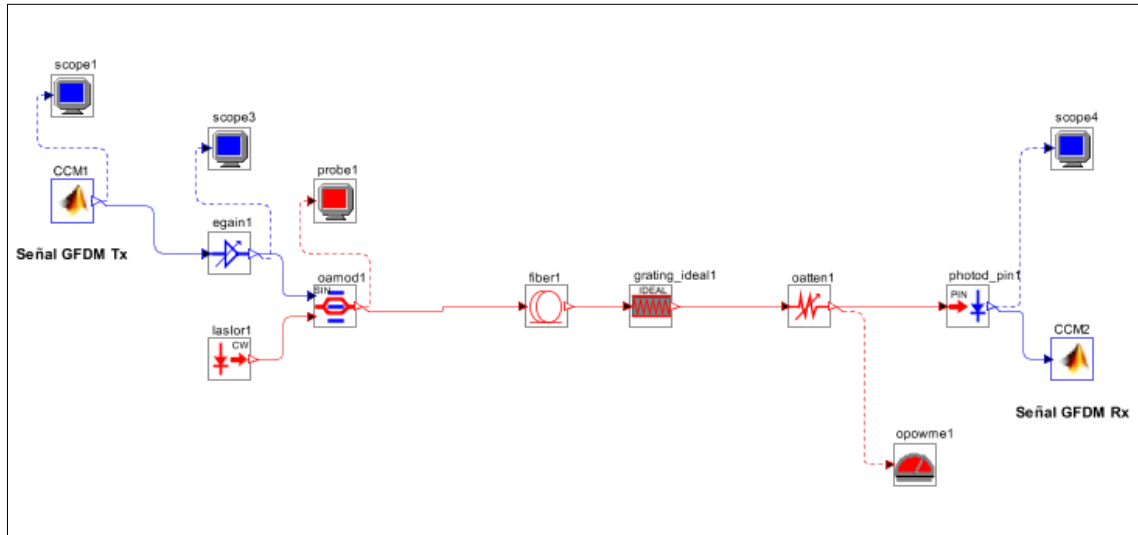
- Michailow, N.** (2004). Generalized Frequency Division Multiplexing for 5th Generation Cellular Networks. *IEEE Transactions on Communications*, 62(9), 3045-3061. doi:0.1109/TCOMM.2014.2345566
- Monge, J. F.** (2017). UOC. Retrieved from Estadística no paramétrica: https://www.uoc.edu/in3/emath/docs/Chi_cuadrado.pdf
- Muciaccia, T., & Gargano, F.** (2015). Advanced Modulation Techniques and a Multi-Pump Raman Amplifier for Cost-Effective Migration to Future UDWDM-PONs. *Journal of Lightwave Technology*, 14, 2986-2996. doi:10.1109/JLT.2015.2418432
- Muñoz, R.** (2017, Diciembre 26). El Pais. El 5G está cada vez más cerca. Retrieved Febrero 11, 2018, from https://elpais.com/tecnologia/2017/12/22/actualidad/1513938892_779798.html
- Nievas, F.** (2017). Estadística Inferencial. Retrieved 02 10, 2018, from <https://sites.google.com/site/nievasies/Inicio/psicoestadistica-ii/textos>
- Powell, P.** (2016). Photonics Media. (P. M. POWELL, Editor) Retrieved Diciembre 8, 2016, from <http://www.photonics.com/Article.aspx?AID=12572>
- Radziunas, M.** (2015, September). Wiase. Retrieved Diciembre 15, 2016, from LDSL-tool: <https://www.wias-berlin.de/software/ldsl/>
- Ranaweera, C., Wong, E., & Nirmalathas, A.** (2017). A Comparison of Multiple Optical Fronthaul Networks. *International Conference on Optical Network Design and Modeling (ONDM)*, 1-6. Retrieved from <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7958544&isnumber=7958513>
- Reyes, P.** (2015). Riuma. (P. y. Málaga, Ed.) Retrieved from https://riuma.uma.es/xmlui/bitstream/handle/10630/10085/TD_Reyes_Iglesias.pdf?sequence=3
- Rodriguez, A.** (2012). Cables y Conectores. Retrieved Diciembre 13, 2016, from <http://www.cablesyconectoreshoy.com/historia-de-la-fibra-optica-ii/>
- Rohde, H.** (2014). Coherent Ultra Dense WDM Technology for Next Generation Optical Metro and Access Networks. *Journal of Lightwave Technology*, 32(10), 2041-2052. doi:10.1109/JLT.2014.2316369
- Rohde, H.** (2014). Field trials of a coherent UDWDM PON: Real-time LTE backhauling, legacy and 100G coexistence. *The European Conference on Optical Communication (ECOC)*, 1-3. doi:10.1109/ECOC.2014.6963850
- Rohde, H., Gottwald, E., Teixeira, A., & Wey, J.** (2014). Coherent Ultra Dense WDM Technology for Next Generation Optical Metro and Access Networks. *Lightwave Technol*, 32, 2041-2052. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1109/JLT.2014.2316369>

- Sallen, O., Valenzuela, J., & Agustí, R.** (2003). Principio de Comunicaciones Móviles (Septiembre 2003 ed.). (U. P. Catalunya, Ed.) Barcelona: UPC,2003.
- Sallent Roig, J. O., & Pérez Romero, J.** (2014). Fundamentos de diseño y gestión de sistemas de comunicaciones móviles celulares. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya. Iniciativa Digital Politècnica. doi:9788498804829
- Schmogrow, R.** (2012). Error Vector Magnitude as a Performance Measure for Advanced Modulation Formats. *Photonics Technology Letters*, 24(1), 61-63.
- Schmogrow, R., & Nebendahl, B.** (2012). Error Vector Magnitude as a Performance Measure for Advanced Modulation Formats. *Photonics Technology letters*, 24(01), 61-63. doi:10.1109/LPT.2011.2172405
- Segarra, J., Sales, V., Prat, J., & Kazovsky, L.** (2017). Flexible coherent UDWDM-PON adapting dynamically to different bandwidths. 2017 19th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), 1-6. doi:10.1109/ICTON.2017.8024857
- Shahpari, A., & Ferreira, R.** (2015). Coherent ultra dense wavelength division multiplexing passive optical networks, In *Optical Fiber Technology*. 26, 100-107. doi:ISSN 1068-5200
- Shravan, B., Mani, V., & Drosopoulos, A.** (2016). Robust Precoded OSTBC for GFDM Systems. In *Procedia Computer Science*, 93, 176-182. doi:1877-0509
- Siddiqua, A.** (2016). 8-Channel wavelength division multiplexing (WDM) with zero BER. 2016 IEEE International Conference on Recent Trends in Electronics, Information & Communication Technology (RTEICT), 2117-2120. doi:10.1109/RTEICT.2016.7808213
- Smolorz, S., Gottwald, E., Rohde, H., & Poustie, A.** (2011). Demonstration of a coherent UDWDM-PON with real-time processing. *Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference*, 1-3. Retrieved from <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5875814&isnumber=5875055>
- SYNOPYS.** (2018). SYNOPYS. Retrieved from *OptSim Product Overview*: <https://www.synopsys.com/optical-solutions/rsoft/system-network-optsim.html>
- Terada, J., Shimada, T., Shimizu, T., & Otaka, A.** (2016). Optical access network technology for 5G wireless front/backhaul network. 016 21st OptoElectronics and Communications Conference (OECC) held jointly with 2016 International Conference on Photonics in Switching (PS), 1-3.
- The 5G Infrastructure Public Private Partnership.** (2014). The next generation of communication networks and services. (D. M. Kennedy, Ed.) Retrieved Noviembre 22, 2016, from www.5g-ppp.eu
- Third Generation Partnership Project.** (2018). The Mobile Broadband Standar. Retrieved from <http://www.3gpp.org/release-15>

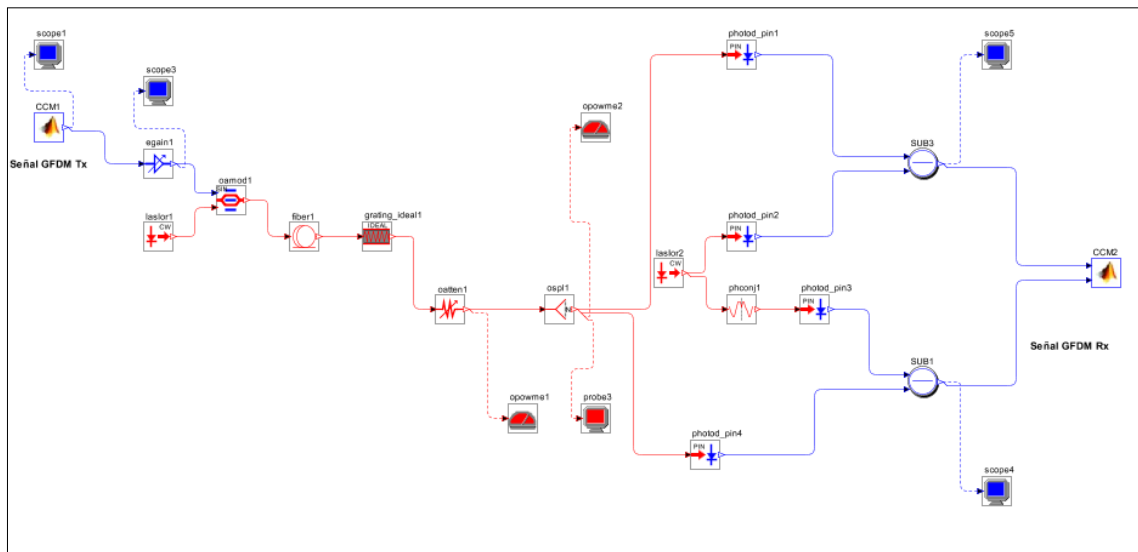
- Torrenco, E.** (2011, Marzo). Coherent Optical Communication Systems.
- Unión Internacional de Telecomunicaciones.** (2005, Julio). Sector de Normalización de las Telecomunicaciones. Retrieved from https://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=e&id=T-REC-G.984.3-200507-S!Amd1!PDF-S&type=items.
- Universidad Nacional Autónoma de México.** (2016, Marzo). Laboratorio virtual de estadística. Retrieved from Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán: <http://asesorias.cuautitlan2.unam.mx/Laboratoriovirtualdeestadistica/>
- Yadav, R.** (2012). Passive-optical-network- (PON-) based converged access network [Invited]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 4(11), B124-B130.
- Yao, X., & Chen, J.** (2017). Wavelength Reuse in an RoF Link Based on CS-DSB, Coherent Detection and DSP. *IEEE Photonics Technology Letters*, 29(12), 975-978. doi:10.1109/LPT.2017.2700763
- Yoshima, S.** (2016). Experimental Investigation of an Optically-superimposed AMCC in 100 Gb/s Coherent WDM-PON for 5G Mobile Fronthaul. *European Conference on Optical Communication*, 1-3. doi:978-3-8007-4274-5

ANEXOS

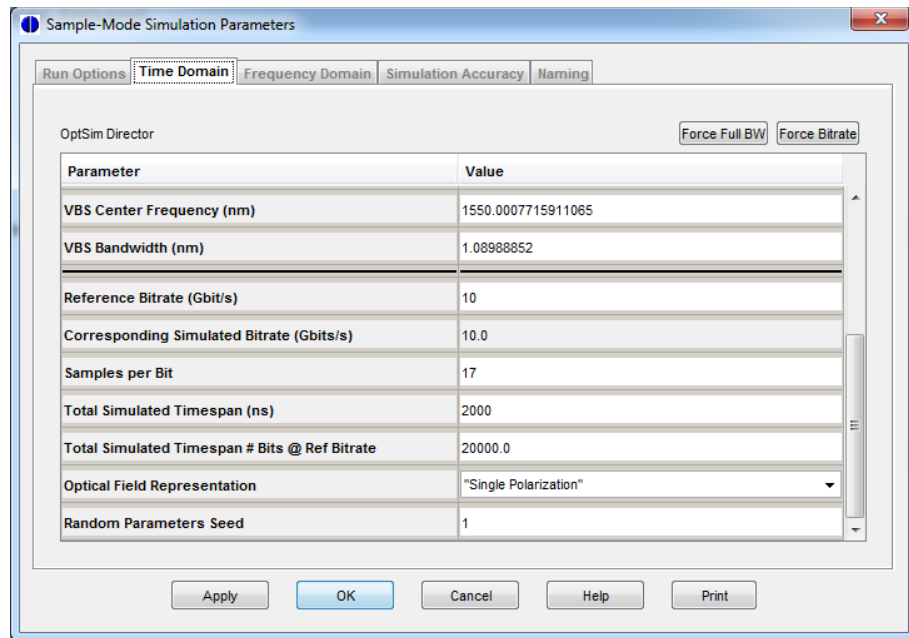
Anexo A: Esquema de detección directa- Co-simulación (Optsim-Matlab)



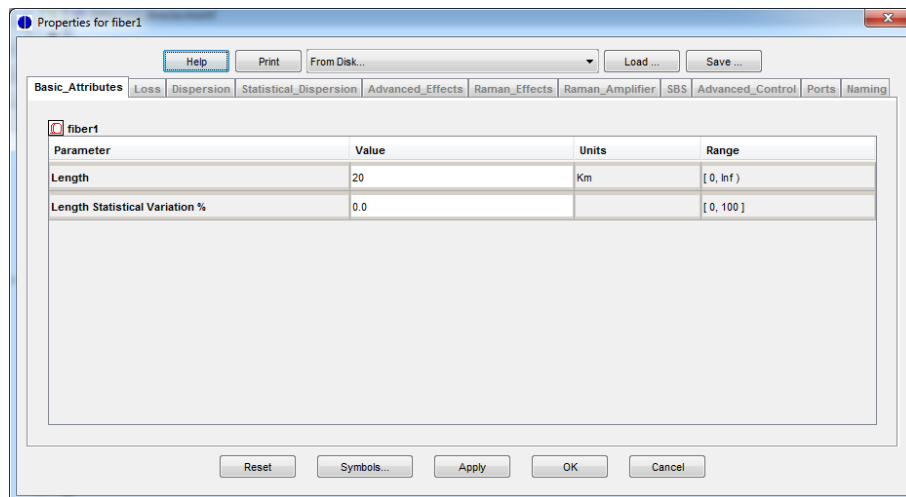
Anexo B: Esquema de detección coherente- Co-simulación (Optsim-Matlab)



Anexo C: Parámetros de configuración de Optsim



Anexo D: Parámetros de configuración de la fibra óptica monomodo –Optism (Parte 1)



Anexo E: Parámetros de configuración de la fibra óptica monomodo –Optism (Parte 2)

Properties for fiber1

Help Print From Disk... Load... Save...

Basic_Attributes Loss **Dispersion** Statistical_Dispersion Advanced_Effects Raman_Effects Raman_Amplifier SBS Advanced_Control Ports Naming

fiber1

Parameter	Value	Units	Range
Reference Frequency for Dispersion	193.41449	THz	(0, Inf)
Reference Wavelength for Dispersion	1550.0	nm	(0, Inf)
Dispersion at the reference frequency	-21.68262	ps ² /km	
Dispersion at the reference frequency	17	ps/nm/km	
Dispersion derivative at the reference frequency	0.14746	ps ³ /km	
Dispersion derivative at the reference frequency	0.07	ps/nm ² /km	
Dispersion second derivative at the reference frequ...	0.0	ps ⁴ /km	
Dispersion third derivative at the reference frequency	0.0	ps ⁵ /km	
Zero-Dispersion Frequency	= 216.81674	THz	
Zero-Dispersion Wavelength	= 1382.69976	nm	

Reset Symbols... Apply OK Cancel