

	<b>GESTIÓN DE SERVICIOS ACADÉMICOS Y BIBLIOTECARIOS</b>	<b>CÓDIGO</b>	FO-GS-15
	<b>ESQUEMA HOJA DE RESUMEN</b>	<b>VERSIÓN</b>	02
		<b>FECHA</b>	03/04/2017
		<b>PÁGINA</b>	1 de 132
<b>ELABORÓ</b> Jefe División de Biblioteca	<b>REVISÓ</b> Equipo Operativo de Calidad	<b>APROBÓ</b> Líder de Calidad	

## RESUMEN TRABAJO DE GRADO

AUTOR:

NOMBRES: DUMAR ALBERTO

APELLIDOS: HIDALGO MONSALVE

FACULTAD: INGENIERÍA

PLAN DE ESTUDIOS: INGENIERÍA ELECTRÓNICA

DIRECTORES:

NOMBRE(S): BYRON

APELLIDOS: MEDINA DELGADO

NOMBRE(S): JESÚS

APELLIDOS: ÁLVAREZ GUERRERO

TÍTULO DEL TRABAJO (TESIS): ANÁLISIS Y COMPENSACIÓN DE LOS EFECTOS DE PROPAGACIÓN LINEALES EN UN ESCENARIO DE RADIO SOBRE FIBRA BASADO EN LAS CARACTERÍSTICAS DE LA TECNOLOGÍA 5G.

RESUMEN:

Radio-sobre-fibra es un soporte rentable para los próximos desarrollos 5G destinados a satisfacer la creciente demanda de información. Sin embargo, estos sistemas están limitados por impedimentos durante la transmisión que reducen la calidad de la comunicación. Para mejorar el rendimiento del sistema, en este trabajo se proponen ecualizadores lineales y no lineales apoyados en algoritmos adaptativos para compensar los efectos de propagación lineales debidos al canal óptico-inalámbrico en un escenario de transmisión de radio-sobre-fibra al considerar los últimos lineamientos para el estándar 5G Nuevo Radio. Los resultados de la simulación en MATLAB muestran que la técnica de ecualización adaptativa propuesta es un candidato prometedor para mejorar las transmisiones de datos de radio por fibra basadas en 5G.

PALABRAS CLAVES: 5G NUEVO RADIO, EFECTOS DISPERSIVOS, RADIO-SOBRE-FIBRA, OFDM, TOPOLOGÍA FIBRA-INALÁMBRICA

CARACTERÍSTICAS:

PÁGINAS: 132

PLANOS: 0

ILUSTRACIONES: 55

CD ROOM: 0

ANÁLISIS Y COMPENSACIÓN DE LOS EFECTOS DE PROPAGACIÓN LINEALES EN  
UN ESCENARIO DE RADIO SOBRE FIBRA BASADO EN LAS CARACTERÍSTICAS DE  
LA TECNOLOGÍA 5G

DÚMAR ALBERTO HIDALGO MONSALVE

UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PLAN DE ESTUDIOS DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA  
SAN JOSÉ DE CÚCUTA

2020

ANÁLISIS Y COMPENSACIÓN DE LOS EFECTOS DE PROPAGACIÓN LINEALES EN  
UN ESCENARIO DE RADIO SOBRE FIBRA BASADO EN LAS CARACTERÍSTICAS DE  
LA TECNOLOGÍA 5G

DÚMAR ALBERTO HIDALGO MONSALVE

Director:

Ph.D. Byron Medina Delgado

Codirector:

Ph.D(c). Jesús Álvarez Guerrero

UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PLAN DE ESTUDIOS DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA  
SAN JOSÉ DE CÚCUTA

2020

## ACTA DE SUSTENTACIÓN DE UN TRABAJO DE GRADO

Fecha: CÚCUTA, 23 DE OCTUBRE DE 2020  
Hora: 18:30  
Lugar: MODALIDAD REMOTA SINCRÓNICO  
Plan de Estudios: INGENIERÍA ELECTRÓNICA  
Título de la Tesis: "ANÁLISIS Y COMPENSACIÓN DE LOS EFECTOS DE PROPAGACIÓN LINEALES EN UN ESCENARIO DE RADIO SOBRE FIBRA BASADO EN LAS CARACTERÍSTICAS DE LA TECNOLOGÍA 5G"  
Jurados: GEINER GIOVANNY BARBOSA CASANOVA, IE MSc  
MARCO AURELIO GARCÍA BERMÚDEZ, IE MSc  
Director: IE, PhD BYRON MEDINA DELGADO  
Codirector: IE, PhD(c) JESÚS ÁLVAREZ GUERRERO

Nombre del Estudiante	Código	Calificación
DUMAR ALBERTO HIDALGO MONSALVE	1161079	CINCO, CERO (5,0)

### LAUREADA



GEINER GIOVANNY BARBOSA CASANOVA



MARCO AURELIO GARCÍA BERMÚDEZ



**DINAEL GUEVARA IBARRA**  
Coordinador Comité Curricular  
Ingeniería Electrónica



**GESTIÓN DE SERVICIOS ACADÉMICOS Y  
BIBLIOTECARIOS**



**CARTA DE AUTORIZACIÓN DE LOS AUTORES PARA LA  
CONSULTA, LA REPRODUCCIÓN PARCIAL O TOTAL Y LA  
PUBLICACIÓN ELECTRÓNICA DEL TEXTO COMPLETO**

Cúcuta,

Señores

BIBLIOTECA EDUARDO COTE LAMUS  
Cúcuta, Norte de Santander

Cordial saludo,

DUMAR ALBERTO HIDALGO MONSALVE, identificado con la C.C. No. 1.116.802.831, autor del trabajo de grado titulado ANÁLISIS Y COMPENSACIÓN DE LOS EFECTOS DE PROPAGACIÓN LINEALES EN UN ESCENARIO DE RADIO SOBRE FIBRA BASADO EN LAS CARACTERÍSTICAS DE LA TECNOLOGÍA 5G presentado y aprobado en el año 2020 como requisito para optar al título de INGENIERO ELECTRÓNICO; autorizo a la biblioteca de la Universidad Francisco de Paula Santander, Eduardo Cote Lamus, para que con fines académicos, muestre a la comunidad en general a la producción intelectual de esta institución educativa, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera:

- Los usuarios pueden consultar el contenido de este trabajo de grado en la página web de la Biblioteca Eduardo Cote Lamus y en las redes de información del país y el exterior, con las cuales tenga convenio la Universidad Francisco de Paula Santander.
- Permita la consulta, la reproducción, a los usuarios interesados en el contenido de este trabajo, para todos los usos que tengan finalidad académica, ya sea en formato CD-ROM o digital desde Internet, Intranet etc.; y en general para cualquier formato conocido o por conocer.

Lo anterior, de conformidad con lo establecido en el artículo 30 de la ley 1982 y el artículo 11 de la decisión andina 351 de 1993, que establece que “**los derechos morales del trabajo son propiedad de los autores**”, los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables.

FIRMA Y CEDULA

CC: 1.116.802.831

Dedicado a mi familia con mucho amor

## Tabla de contenido

1. Introducción	14
2. Descripción del problema	15
2.1. Planteamiento del problema	15
2.2. Formulación	18
3. Justificación	19
3.1. Beneficios tecnológicos	19
3.2. Beneficios económicos	19
3.3. Beneficios sociales	19
3.4. Beneficios institucionales	20
4. Limitaciones y delimitaciones	21
4.1. Limitaciones	21
4.2. Delimitaciones	21
5. Objetivos	22
5.1. Objetivo general	22
5.2. Objetivos específicos	22
6. Marco referencial	23
6.1. Antecedentes	23
6.1.1. Marco internacional.	23
6.1.2. Marco nacional.	26
6.2. Marco teórico	28
6.2.1. Sistemas de comunicaciones.	28
6.2.2. Sistemas de comunicaciones ópticos.	33
6.2.3. Sistemas de comunicaciones inalámbricos.	51
6.2.4. Sistemas de comunicaciones de RoF.	53
6.2.5. Forma de onda OFDM para 5G NR.	56
6.2.6. Métodos de ecualización adaptativa.	57
6.3. Marco legal	60
7. Resultados	61
7.1. Recopilación de información	61
7.2. Simulación del escenario de RoF con características de red 5G	62
7.2.1. Simulación de la señal RF-OFDM.	62

7.2.2. Simulación del canal óptico.	65
7.2.3. Simulación del canal inalámbrico.	68
7.3. Análisis de los efectos de propagación	70
7.3.1. Herramientas empleadas.	71
7.3.2. Análisis de las degradaciones.	73
7.4. Implementación de los algoritmos de compensación	80
7.4.1. Herramientas empleadas.	80
7.4.2. Implementación de los algoritmos de compensación.	82
7.5. Evaluación del desempeño de los algoritmos de compensación	83
7.5.1. Compensación del canal óptico.	84
7.5.2. Compensación del canal inalámbrico.	90
7.5.3. Compensación del canal óptico-inalámbrico.	92
7.6. Difusión de los resultados	97
7.6.1. Artículos aceptados en revistas científicas.	98
7.6.2. Artículos preparados para sometimiento.	98
7.6.3. Ponencias realizadas en eventos.	98
8. Conclusiones	99
Referencias bibliográficas	103
Anexos	109



## Lista de figuras

Fig. 1. Tecnología ROADMs en el proyecto 5G-PHOS.	25
Fig. 2. Diagrama de bloques de un sistema de comunicaciones.	29
Fig. 3. Diagrama de bloques de un transmisor en un sistema de comunicaciones.	30
Fig. 4. Modulación digital. (a) Desplazamiento de amplitud, (b) Desplazamiento de fase.	31
Fig. 5. Canales de comunicación. (a) Canal eléctrico, (b) Canal óptico, (c) Canal inalámbrico.	32
Fig. 6. Diagrama de bloques de un receptor en un sistema de comunicaciones.	33
Fig. 7. Diagrama de bloques de un sistema óptico básico.	34
Fig. 8. Modulación en fibra óptica. (a) Modulación directa, (b) Modulación externa.	35
Fig. 9. Capas típicas en un cable de fibra óptica.	36
Fig. 10. Fibra óptica según su índice de refracción. (a). Fibra de índice escalonado, (b) Fibra de índice gradual.	37
Fig. 11. Fibra óptica según su modo. (a) Fibra monomodo, (b) Fibra multimodo.	38
Fig. 12. Efectos de propagación de la fibra óptica.	39
Fig. 13. Relación de ventana de trabajo y atenuación.	41
Fig. 14. Efecto de la ISI en la fibra óptica multimodo.	41
Fig. 15. Retardo de grupo diferencial en la fibra óptica.	41
Fig. 16. Ensanchamiento de pulso por dispersión cromática en la fibra óptica.	42
Fig. 17. Efecto de la ISI debido a la CD. (a) ISI visto en un tren de pulsos, (b) ISI visto desde un diagrama de constelaciones.	42
Fig. 18. Gráfica de dispersión en la fibra óptica.	43
Fig. 19. Efecto de la Modulación de Fase Inducida en la fibra óptica.	44
Fig. 20. Efecto de la Mezcla de Cuarta Onda en la transmisión por fibra óptica.	45
Fig. 21. Efecto de la Dispersión Estimulada de Raman en la fibra óptica.	46
Fig. 22. Fotodetectores. (a) Diodo PIN, (b) Diodo avalancha.	47
Fig. 23. Topología básica de la tecnología PON.	49
Fig. 24. Diagrama básico de un sistema de comunicaciones inalámbricas.	51
Fig. 25. Diagrama esquemático de una antena común.	52
Fig. 26. Topología básica de una red inalámbrica.	53
Fig. 27. Escenario de transmisión RoF.	54
Fig. 28. Diagrama de bloques de la transmisión IM/DD en un escenario de RoF.	55
Fig. 29. Diagrama de bloques de la transmisión RF-OFDM.	56

Fig. 30. Filtro adaptativo de estructura lineal.	57
Fig. 31. Filtro adaptativo de estructura DFE.	58
Fig. 32. Herramientas de análisis cualitativo. (a) Diagrama de constelación, (b) Diagrama de ojo.	73
Fig. 33. Curvas de BER vs $E_b/N_0$ . Análisis óptico para 1, 20, 60 y 100 km de fibra.	74
Fig. 34. Diagramas de constelación. Análisis óptico para 20 km de fibra. (a) Desempeño a $E_b/N_0 = 14$ dB, (b) Desempeño a $E_b/N_0 = 4$ dB.	75
Fig. 35. Diagramas de ojo. Análisis óptico para 20 km de fibra. (a) Desempeño a $E_b/N_0 = 14$ dB, (b) Desempeño a $E_b/N_0 = 4$ dB.	76
Fig. 36. Diagramas de constelación. Análisis óptico con potencia de ruido óptico despreciable. (a) Desempeño a 1 km de fibra, (b) Desempeño a 100 km de fibra.	77
Fig. 37. Diagramas de ojo. Análisis óptico con potencia de ruido óptico despreciable. (a) Desempeño a 1 km de fibra, (b) Desempeño a 100 km de fibra.	78
Fig. 38. Curvas de EVM vs $E_b/N_0$ . Análisis inalámbrico.	79
Fig. 39. Análisis inalámbrico con potencia de ruido óptico despreciable. (a) Desempeño por medio de diagrama de constelación, (b) Desempeño por medio de diagrama de ojo.	80
Fig. 40. Diagrama de flujo de la implementación de los algoritmos de compensación.	83
Fig. 41. Curvas de BER vs $E_b/N_0$ . Compensación óptica para 100 km de fibra.	84
Fig. 42. Diagramas de constelación. Compensación óptica para 100 km de fibra con potencia de ruido óptico despreciable. (a) Desempeño del ecualizador DFE RLS, (b) Desempeño del ecualizador CMA lineal.	86
Fig. 43. Diagramas de ojo. Compensación óptica para 100 km de fibra con potencia de ruido óptico despreciable. (a) Desempeño sin ecualización, (b) Desempeño del ecualizador DFE RLS, (c) Desempeño del ecualizador CMA lineal.	87
Fig. 44. Curvas de EVM vs Distancia de Fibra. Compensación óptica. (a) Desempeño de los ecualizadores RLS, CMA y MMSE lineales, (b) Desempeño de los ecualizadores DFE LMS, DFE RLS y LMS lineal.	87
Fig. 45. Diagrama de constelación. Compensación óptica para el tramo de fibra máximo extendido con ecualización DFE RLS.	89
Fig. 46. Diagramas de ojo. Compensación óptica para el tramo de fibra máximo extendido. (a) Desempeño sin ecualización, (b) Desempeño con ecualización DFE RLS.	90
Fig. 47. Curvas de BER vs $E_b/N_0$ . Compensación inalámbrica.	91
Fig. 48. Diagrama de constelación. Compensación inalámbrica con ecualización MMSE lineal.	91
Fig. 49. Diagramas de ojo. Compensación inalámbrica. (a) Desempeño sin ecualización, (b) Desempeño con ecualización MMSE lineal.	92
Fig. 50. Curvas de BER vs $E_b/N_0$ . Compensación óptico-inalámbrica.	93

Fig. 51. Diagramas de constelación. Compensación óptico-inalámbrica con potencia de ruido óptico despreciable. (a) Desempeño con ecualización DFE RLS, (b) Desempeño con ecualización RLS lineal.	94
Fig. 52. Diagramas de ojo. Compensación óptico-inalámbrica con potencia de ruido óptico despreciable. (a) Desempeño sin ecualización, (b) Desempeño con ecualización DFE RLS, (c) Desempeño con ecualización RLS lineal.	95
Fig. 53. Curvas de EVM vs Distancia de Fibra. Compensación óptico-inalámbrica.	96
Fig. 54. Diagrama de constelación. Compensación óptico-inalámbrica para tramo de fibra máximo con ecualización DFE RLS.	97
Fig. 55. Diagramas de ojo. Compensación óptico-inalámbrica para el tramo de fibra máximo extendido. (a) Desempeño sin ecualización, (b) Desempeño con ecualización DFE RLS.	97

## Lista de tablas

Tabla 1. Elementos ópticos característicos del 5G-PHOS.	26
Tabla 2. Estándares inalámbricos.	28
Tabla 3. Numerologías de transmisión OFDM soportadas para 5G NR.	63
Tabla 4. Parámetros de simulación de la transmisión RF-OFDM.	64
Tabla 5. Parámetros de simulación del canal óptico	67
Tabla 6. Modelos de canal TDL-ii	69
Tabla 7. Configuración de los ecualizadores adaptativos usados.	81

## Lista de anexos

Anexo 1. Paper 1: Compensation of frequency mismatch between transmitter and receiver local oscillators to enhance 5G-based Radio-over-Fiber transmissions	109
Anexo 2. Paper 2: Análisis de los efectos dispersivos en un escenario de Radio-sobre-Fibra con características de la red 5G	118
Anexo 3. Ponencia 1: Análisis de un escenario de Radio-sobre-Fibra como propuesta para soportar los requerimientos de la red 5G	129
Anexo 4. Ponencia 2: Compensación de los efectos dispersivos en un escenario de transmisión de Radio-sobre-Fibra con características de la red 5G	131

## 1. Introducción

En la actualidad, el porcentaje de población que emplea los medios digitales como principal fuente de información aumenta cada día, demandando aplicaciones de uso masivo como la transmisión de video (Videojuegos, Video 3D, HDTV). A su vez, la idea de ciudades interconectadas que soporten extensas redes de sensores ha venido ganando terreno, donde el principal enfoque es que todo se encuentre digitalizado, medido y automatizado. Tanto las necesidades de los usuarios como las del esquema urbano, exigen importantes requerimientos de ancho de banda y movilidad, para lo cual un sistema de Radio sobre Fibra (RoF) basado en las características de la red 5G ofrece una alternativa de transmisión de información capaz de suplir tal demanda y también la que se prevé para los próximos años.

Los sistemas RoF están constituidos por una etapa óptica seguida de una etapa inalámbrica, con las cuales es posible suplir las necesidades de ancho de banda y movilidad, respectivamente. Sin embargo, a pesar de sus altas capacidades, este tipo de sistemas son afectados por los efectos de propagación lineales, entre los que se encuentra primordialmente la Interferencia Intersimbólica (ISI) como uno de los factores de mayor incidencia negativa en estos.

Por lo anterior, la finalidad de esta propuesta es analizar cómo los efectos de propagación limitan el desempeño de los sistemas RoF, utilizando herramientas de análisis cualitativo y cuantitativo. Posteriormente, estos serán compensados por medio de métodos de ecualización lineal y no lineales apoyados en algoritmos de compensación adaptativos. Así, manipulando las características del canal de transmisión para ambos medios, será posible dimensionar y contrarrestar las limitaciones debidas a los fenómenos de propagación de los sistemas RoF como una alternativa para una red 5G.

## 2. Descripción del problema

A continuación, se describe el problema a tratar en este documento mediante su planteamiento y formulación.

### 2.1. Planteamiento del problema

En la actualidad, el porcentaje de población que emplea los medios digitales como principal fuente de información aumenta cada día, demandando aplicaciones de uso masivo como los servicios de difusión de video de ultra-alta calidad y de realidad virtual. A la vez, la idea de ciudades interconectadas que soporten extensas redes de sensores ha venido ganando terreno, donde el principal enfoque es que todo se encuentre digitalizado, medido y automatizado. Tanto las necesidades de los usuarios como las del esquema urbano exigen importantes requerimientos de ancho de banda y movilidad, para lo cual un sistema de Radio-sobre-Fibra (RoF, *Radio-over-Fiber*) basado en las características de la red 5G ofrece una alternativa de transmisión de información capaz de suplir tal demanda y también la que se prevé para los próximos años.

Un sistema de Radio-sobre-Fibra está constituido por una etapa óptica seguida de una etapa inalámbrica, que unificadas ofrecen a los usuarios un sistema de transmisión de información capaz de cumplir con la demanda actual de telecomunicaciones. Su principio de funcionamiento consiste en enviar la información a través de un medio óptico, donde la luz es modulada por una señal de radio para facilitar el acceso inalámbrico. Esta configuración permite transmitir el mensaje directamente desde una Estación de Control (CS, *Control Station*) hacia una Estación Base (BS, *Base Station*), lo cual se ve reflejado no solo en favor del usuario, sino en un ahorro energético importante para las compañías de telecomunicaciones (Ghassemlooy et al., 2018).

Sin embargo, debido a que se emplean dos medios diferentes, los factores adversos sufridos en ambos escenarios dañan en doble medida la información que se intenta transmitir, apareciendo por un lado los efectos de propagación en la fibra (divididos entre efectos lineales y no lineales), cuyo impacto altera la información y genera ruido. Entre los efectos lineales de la fibra se encuentra principalmente la Dispersión Cromática (CD, *Chromatic Dispersion*), la cual consiste en el ensanchamiento de las componentes espectrales de los pulsos ópticos que viajan dentro de la fibra. Por otro lado, en el canal inalámbrico aparece la dispersión por multitrayectoria (MP, *Multipath Propagation*), que se da cuando las señales transmitidas inalámbricamente llegan al usuario desde diferentes caminos, surgiendo diversas componentes por multitrayectoria que pueden diferir en cuanto a ganancias y retardos (Agrawal, 2013; Yang, 2018).

Ambos efectos —CD y MP—, generan degradaciones indeseadas en la comunicación reflejadas como interferencia entre símbolos adyacentes, haciendo que el mensaje final sea alterado y se obtenga información inexacta; este fenómeno se conoce como Interferencia Intersimbólica (ISI) y representa el principal problema a analizar y compensar en este trabajo (Asplund et al., 2020).

Solo pocos autores nacionales han presentado propuestas como “*Implementación de una propuesta de Radio sobre Fibra para la comunicación de redes móviles basadas en Femtoceldas*”, donde se propone una solución alternativa para las redes 5G alámbrico-inalámbricas para futuras aplicaciones; en esta se explica que la incorporación de femtoceldas a un sistema de RoF tendría un impacto mayormente positivo, ya que su reducido tamaño ofrece una mayor capacidad por usuario para abastecer la demanda de información actual. En otra publicación titulada “*Generación de señales para sistemas radio sobre fibra basados en combinación óptica*”, se comparan técnicas de generación de señales para el transporte de información en sistemas RoF, de donde



posteriormente se determinan los estándares de calidad que estas garantizan en función de su aplicabilidad en las necesidades de la actualidad (Aguirre et al., 2015; Oswaldo et al., 2015).

Sin embargo, a pesar de que las investigaciones alrededor de los sistemas RoF propuestos hoy en día ofrecen importantes resultados en favor de la transmisión de información, sigue siendo necesario mantener un enfoque hacia la aplicación de algoritmos de compensación que lleven a estos sistemas a lograr un mejor desempeño; por esta razón, es necesario establecer un protocolo adecuado para la ejecución de dichos algoritmos que funcionen indistintamente, tanto en el medio óptico como en el medio inalámbrico, haciendo posible la compensación de la ISI para múltiples escenarios en un sistema RoF con características 5G.

Con base en lo anterior, en esta propuesta se analiza cómo los efectos de propagación limitan el desempeño de los sistemas RoF utilizando herramientas de análisis cualitativo como diagramas de constelación y de ojo, y de tipo cuantitativo como medidas del EVM (Error Vector Magnitude) y BER (Bit Error Rate). Posteriormente, dichos efectos son compensados por medio de ecualizadores lineales y no lineales apoyados en algoritmos adaptativos de Módulo Constante (CMA, *Constant Modulus Algorithm*), Cuadrado Mínimo Recursivo (RLS, *Recursive Least Square*), Cuadrado de la Media Mínima (LMS, *Least Mean Square*) y Mínimo Error Cuadrado Medio (MMSE, *Minimum Mean Square Error*) para compensar la ISI como consecuencia de la CD en los sistemas ópticos y la MP en los sistemas inalámbricos. Así, manipulando las características del canal de transmisión para ambos medios, es posible dimensionar y contrarrestar las limitaciones debidas a los fenómenos de propagación en sistemas RoF con características de red 5G.

## 2.2. Formulación

Actualmente, muchas personas acceden a usar servicios bajo demanda como la transmisión de video (Videojuegos, Video 3D, HDTV), mientras que algunos gobiernos están comenzando a proyectar la construcción de infraestructuras urbanas que soporten atención de salud a distancia, así como también redes de sensores que abarquen ciudades enteras convirtiéndolas en inteligentes. Estas son algunas de las aplicaciones que más flujo de datos, cobertura y capacidad de carga/descarga necesitan, por lo que abordar la compensación de los efectos de propagación para un medio óptico-inalámbrico se hace necesario para contrarrestar la ISI en un sistema RoF, el cual figura como la solución directa a dichos requerimientos. Sin embargo, del planteamiento de un escenario óptico-inalámbrico que supla tal demanda, surge la pregunta: ¿Qué tanto incide la compensación de los efectos de propagación lineales en los medios óptico e inalámbrico en el rendimiento final de un sistema RoF diseñado para soportar la red 5G?

### **3. Justificación**

Los beneficios globales de analizar y compensar los efectos de propagación en un sistema de RoF son descritos en esta sección del documento.

#### **3.1. Beneficios tecnológicos**

Los resultados de este estudio ayudan a determinar qué tan beneficiosa es la aplicación de un sistema RoF para soportar los requerimientos de la red 5G, incentivando así a la comunidad que trabaja en telecomunicaciones a impulsar el desarrollo de estas tecnologías emergentes, así como la importación de conocimientos y desarrollo relacionados a estos sistemas.

Debido a que, tanto en el ámbito regional como en el nacional, el número de estudios de este tipo de escenarios es escaso, por medio de la realización de este proyecto se informa a la comunidad que trabaja en telecomunicaciones, que los sistemas de transmisión RoF son apropiados para sustentar la gran demanda de información actual, la cual irá en aumento de forma gradual a través de los años.

#### **3.2. Beneficios económicos**

Promover tecnologías como la de RoF representa ahorros económicos potenciales a las empresas de telecomunicaciones, pues con su utilización es posible centralizar los dispositivos generadores de señales transportadoras (portadoras) de información —originalmente desplegadas a lo largo de bastas distancias— hacia un solo punto de operación, haciendo que el suministro de energía sea menos costoso para dichas compañías.

#### **3.3. Beneficios sociales**

Por medio del estudio de este escenario, se incentiva a las empresas de telecomunicaciones a optar por este tipo de tecnologías, ya que los usuarios finales obtienen servicios de mejor calidad

y con mejores prestaciones, al igual que existe un abastecimiento de la demanda de la información superior, el cual se ve reflejado en el mejoramiento de la calidad de vida de los residentes.

El uso de la tecnología RoF cumple los requerimientos de las redes con alta demanda de información, haciendo que estas funcionen a un nivel óptimo y se logre una comunicación instantánea, cuyo impacto no solo impulsa un mejor nivel de vida entre los ciudadanos, sino también un aumento en la productividad general de las zonas donde dicha tecnología es empleada.

### **3.4. Beneficios institucionales**

Con este estudio se logra que la UFPS sea una de las pocas instituciones nacionales que están fijando su mirada en el análisis de los sistemas RoF con características de red 5G, los cuales están siendo empleados mayormente en países desarrollados, lo que permite a la universidad rotar en la órbita de las tecnologías de las telecomunicaciones de la última generación.

Finalmente, este estudio también sirve como apoyo teórico-técnico a los contenidos de las asignaturas relacionadas con fibra óptica y radio propagación, incentivando a los nuevos tesisistas a continuar con las investigaciones enfocadas en la migración hacia mejores alternativas de telecomunicación, promoviendo de esta manera el estudio y desarrollo de nuevas tecnologías por parte de la institución.

## 4. Limitaciones y delimitaciones

Las limitaciones y delimitaciones de este proyecto son explicadas en esta sección.

### 4.1. Limitaciones

Debido a que no existen en la UFPS los equipos y laboratorios requeridos para la implementación del proyecto, este trabajo de investigación fue limitado a obrar dentro del marco de simulaciones y análisis teóricos, valiéndose de algoritmos de compensación, de herramientas de evaluación cualitativas y cuantitativas, al igual que del modelado de sistemas de transmisión-recepción —de tipo óptico e inalámbrico—, para poder llevar a cabo las actividades que lo contemplan.

Las simulaciones generadas en favor del análisis y la compensación de los efectos lineales en un escenario de Radio-sobre-Fibra, se vieron limitadas a su vez por los parámetros establecidos por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU-T) y el Proyecto Asociado de Tercera Generación (3GPP), quienes determinan los estándares y características de las tecnologías de las telecomunicaciones de última generación 5G.

### 4.2. Delimitaciones

Esta propuesta se comprometió a hacer un análisis de los efectos de propagación lineales, tanto para la parte óptica como para el medio inalámbrico, así como a compensar los errores debidos a la dispersión cromática solo en la parte óptica de un escenario de RoF con características de red 5G. Lo anterior fue llevado a cabo empleando un modelo básico de un canal óptico-inalámbrico, que permite variar parámetros como la distancia y la potencia de ruido externo, haciendo posible analizar el desempeño de los algoritmos de compensación sobre los efectos de propagación de interés.

## 5. Objetivos

En esta sección se enuncian tanto el objetivo general como los objetivos específicos a cumplir dentro del documento.

### 5.1. Objetivo general

Analizar y compensar los efectos de propagación lineales debidos al canal óptico en un sistema de comunicaciones RoF basado en las características de una red 5G.

### 5.2. Objetivos específicos

- Recopilar información acerca de los sistemas de comunicaciones RoF, los conceptos teóricos de los sistemas de comunicación y el principio de funcionamiento de los dispositivos vinculados a estos.
- Simular el escenario de un sistema RoF con características de red 5G mediante el uso de las herramientas computacionales.
- Analizar los efectos de propagación obtenidos de la simulación del sistema de comunicaciones RoF mediante herramientas de análisis de carácter cualitativo y cuantitativo.
- Implementar algoritmos de compensación basados en filtros adaptativos para compensar los efectos de propagación propios de los sistemas de comunicaciones RoF.
- Evaluar el desempeño de los algoritmos de compensación sobre los efectos de propagación del sistema RoF.
- Difundir los resultados obtenidos en la implementación del proyecto entre la comunidad científica y académica.

## 6. Marco referencial

Esta sección del documento está orientada a cubrir parte de los aspectos y conocimientos esenciales para el entendimiento de esta propuesta, así como de enunciar los proyectos afines más representativos nacional e internacionalmente.

### 6.1. Antecedentes

En esta sección del documento, se presenta una descripción breve de los proyectos más representativos de la tecnología RoF, tanto a nivel nacional como internacional.

#### 6.1.1. Marco internacional.

Un número importante de investigaciones se han llevado a cabo en el plano internacional, como la realizada en la *Technical University of Denmark* titulada “*Covergencia de Sistemas de Comunicación Ópticos e Inalámbricos*”, donde se exploran las tendencias de los sistemas de comunicación de convergencia óptico-inalámbricos y se profundiza en el rol que las tecnologías ópticas están tomando para la generación de infraestructuras de redes multiservicio (Tafur Monroy et al., 2009).

Así mismo, se presentan ejemplos de los resultados de investigaciones efectuadas en el grupo DTU Fotonik, donde se enfocan los esfuerzos en la integración de señales de servicios fijos e inalámbricos sobre una misma red de acceso, reflejándose en una mejor utilización de la infraestructura óptica establecida (Tafur Monroy et al., 2009).

Hoy en día, uno de los proyectos a gran escala de mayor impacto que apunta a la adaptación de la infraestructura existente a las nuevas tecnologías de la comunicación, es el 5G-PHOS (5G *integrated Fiber-Wireless networks exploiting existing photonic technologies for high-density SDN-programmable network architectures*), que se encuentra en estos momentos en ejecución en

Europa. Este complementa la segunda fase de la iniciativa continental de “La Asociación Pública-Privada de Infraestructura 5G” (5GPPP, *The 5G Infrastructure Public Private Partnership*), bajo la dirección de la Comisión Europea y la Industria Europea de las TIC (*European ICT industry*) (5G-PHOS, 2016).

5G-PHOS es un proyecto colaborativo lanzado en septiembre del 2017 que, por un periodo de tres años, estará orientado a ocupar tecnología 5G integrada a redes de fibra inalámbrica (Fiber-Wireless), hacia la implementación de redes programables SDN (*Software-Defined Networking*) por medio de la utilización de las tecnologías fotónicas existentes, con lo cual se intentan diseñar redes para áreas de alta densidad, ultra-alta densidad y áreas calientes (*Hot-Spots*) para así cumplir con la actual creciente demanda de las telecomunicaciones (5G-PHOS, 2016). Para lograr esto, el proyecto combina 4 tecnologías clave: Redes de Acceso Radio Centralizadas (C-RAN, *Centralized-Radio Access Network*), mmWave, Densificación de Redes (Network Densification) y MIMO Masivo (Massive MIMO, *Massive Multiple-input multiple-output*) (Phosnet Researchgroup, 2018).

La tecnología C-RAN propone reubicar las unidades en bandabase (BBU, *BaseBand Unit*), que anteriormente se ubicaban en los radiotransmisores (RRH, *Remote Radio Head*), hacia áreas más centralizadas, donde se hacen más fáciles, tanto la provisión de energía como el control climático; por otro lado, la tecnología mmWave ofrece un ancho de banda de alrededor de 270 GHz y velocidades de transmisión inalámbrica muy altas, pero a su vez se haya susceptible a las altas pérdidas por distancia, para lo cual la tecnología de Densificación de Redes propone el despliegue de antenas de menor tamaño cercanas a los usuarios, cuya ejecución permitiría la reutilización del espectro facilitando la introducción de ondas de radio milimétricas. Finalmente, la tecnología Massive MIMO provee el despliegue masivo de estas antenas, que dota al sistema



general de un mejor aprovechamiento del espectro por medio de la multiplexación espacial de varios usuarios, lo que implica mejor eficiencia en la utilización de la energía. La Fig. 1 Ilustra la topología de este sistema (Phosnet Researchgroup, 2018).

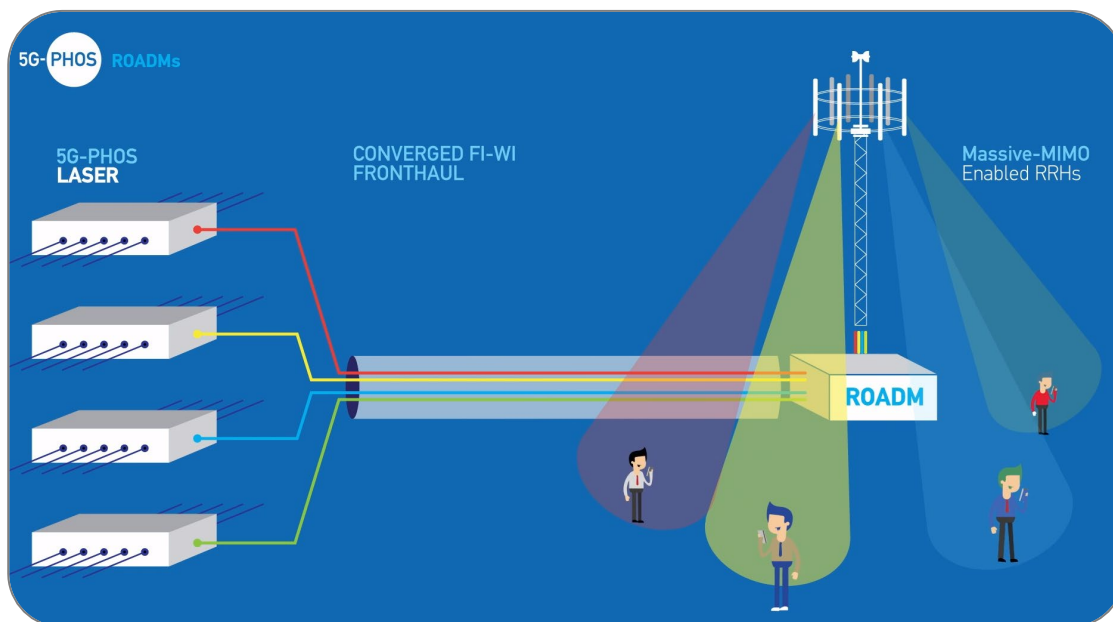


Fig. 1. Tecnología ROADMs en el proyecto 5G-PHOS.  
Fuente: (Phosnet Researchgroup, 2018).

La utilización de estas tecnologías representa ya un gran costo en sí mismas, para lo cual 5G-PHOS se plantea unirlas aprovechando específicamente la modulación óptica para transformar las señales de información de RF hacia el medio óptico, de tal forma que el envío de información se realice efectivamente desde los RRH hasta las antenas; a la vez, una nueva tecnología como la *Optical Beamforming Network (OBFNs)*, hace llegar la información de forma sincronizada a las antenas adyacentes, donde es recibida y multiplexada de forma selectiva por multiplexores ópticos reconfigurables de tipo Add-Drop (ROADMs, *Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexers*), cuyo propósito es dar la capacidad al sistema de agregar o despreciar a selección canales portadores de onda de una fibra, sin necesidad de efectuar una conversión eléctrico-óptica nuevamente.

Finalmente, haciendo un acople entre la tecnología WDM y la transmisión RoF, se admite el envío de varios haces de luz a través de la fibra, se resta complejidad al sistema y se aumenta la

eficiencia del espectro. La Tabla 1 Engloba las características más relevantes de los sistemas de RoF empleados en el proyecto 5G-PHOS (Phosnet Researchgroup, 2018).

Tabla 1. Elementos ópticos característicos del 5G-PHOS.

Tecnología global	Velocidad de transmisión óptica	Factor de ahorro de energía	Relación de división	Año	Ancho de banda inalámbrico
RoF	> 100 Gbps	10	Por determinar	2017	~ 270 GHz
Referencias	(Phosnet Researchgroup, 2018)				

Además de las especificaciones fundamentales, como el ancho de banda y las velocidades de transmisión, el factor de ahorro de energía ha pasado a tomar un papel más relevante en la actualidad a la hora de hablar de tecnologías emergentes, puesto que esto significa finalmente, que se estará brindando un mejor y más efectivo servicio a la par de una mayor eficiencia energética.

### 6.1.2. Marco nacional.

En contraste, ha sido moderado el número de investigaciones publicadas nacionalmente sobre sistemas de RoF; sin embargo, algunos autores nacionales han presentado propuestas como “*Implementación de una propuesta de Radio sobre Fibra para la comunicación de redes móviles basadas en Femtoceldas*”, donde exponen el uso del RoF como una solución alternativa para la nueva generación de redes alámbrico-inalámbricas para futuras aplicaciones, al igual que definen la arquitectura de RoF como una nueva red de acceso que soportaría tecnologías emergentes como las de 5G (Aguirre et al., 2015).

A lo largo del documento, también se explica que la incorporación de femtoceldas a un sistema de RoF tendría un impacto mayormente positivo, ya que su reducido tamaño permite ofrecer una mayor capacidad por usuario, así como mejorar la cobertura, incrementar la tasa de bits y mejorar la calidad del servicio. En consecuencia, esta propuesta implicaría tener un mayor número de estaciones, las cuales incrementan la complejidad y el costo del sistema (Aguirre et al., 2015).

En otra publicación realizada en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, titulada “Generación de señales para sistemas radio sobre fibra basados en combinación óptica”, se presenta un estudio comparativo de técnicas de generación de señales para el transporte de información en sistemas de RoF, por medio de la combinación óptica (Oswaldo et al., 2015). Este estudio se centra en tres diferentes técnicas de generación: brazo doble, generación en paralelo y generación serial, donde se define un modelo analítico para cada una de ellas con el fin de describir los elementos, la configuración y los procesos involucrados en la generación de señales RoF. Posteriormente, se modelan las funciones de campo eléctrico obtenidas, con el fin de evaluar la calidad de las señales generadas en función de los índices de modulación establecidos (Oswaldo et al., 2015).

Por su parte, la publicación lanzada por la Universidad Nacional de Colombia sede Manizales, titulada “Hacia la próxima generación de sistemas de Radio sobre Fibra de banda ancha: retos tecnológicos en la banda de las ondas milimétricas”, identifica en su escrito, la tendencia hacia el incremento en la frecuencia de la portadora de radiofrecuencia en la banda de las ondas milimétricas (75-100 GHz), que indican que la próxima generación de sistemas de RoF, funcionará bajo el ancho de banda mencionado, y las especificaciones de las señales eléctricas generadas deben acoger tecnologías como las presentadas en la Tabla 2. Más adelante, se explica un método para la transmisión de señales de RF, llamado *generación óptica remota de forma heterodina*, cuyo principio de funcionamiento consiste en generar más de una señal óptica por una fuente de luz; una de las cuales será posteriormente modulada por la señal que lleva la información y mezclada finalmente con la segunda señal para formar una señal de RF a la salida. Las principales ventajas de este método son su soporte a detección de mayores potencias y brindar una mejor

relación señal portadora a ruido (CNR, *carrier-to-noise ratio*), así como permitir la generación de señales de altas frecuencias (Granada Torres et al., 2011).

Tabla 2. Estándares inalámbricos.

Estándar inalámbrico	Velocidad de transmisión	Frecuencia de portadora	Alcance
ZigBee	< 250 kbps	915 MHz, 2.4 GHz	Corto
WiBree	< 1 Mbps	2.4 GHz	Corto
Bluetooth 5.0	990 kbps	2.4 GHz	Medio
NFC	424 kbps	13.56 MHz	Corto
802.11b	54 Mbps	2.4 GHz	Medio
802.11g	11 Mbps	2.4 GHz	Medio
802.11n	600 Mbps	2.4/5 GHz	Medio
802.11ac	450/6900 Mbps	5 GHz	Medio
802.11ad	7000 Mbps	60 GHz	Medio
802.11ax	450/10000 Mbps	2.4/5 GHz	Medio
GSM	9.6 kbps	900 MHz, 1800 MHz, 1900 MHz	Largo
GPRS 2.5G	171.2 kbps	900 MHz, 1800 MHz, 1900 MHz	Largo
EDGE 2.75G	473.6 kbps	900 MHz, 1800 MHz, 1900 MHz	Largo
UMTS (3G)	2 Mbps	1.8GHz a 2.2GHz	Largo
HSDPA 3.5G	14 Mbps	1900 MHz, 2100 MHz	Largo
HDPA+	42 Mbps	1700 MHz, 2100 MHz	Largo
WRAN	18 Mbps	54 MHz – 862 MHz	Largo
WiMAX	75 Mbps	2.3 GHz, 2.5 GHz, 3.5 GHz y 5 GHz	Largo
LTE 4G	< 144 Mbps	1900 MHz, 3600 MHz	Largo
LTE advanced	< 1 Gbps	1900 MHz – 3600 MHz	Largo
WiGig	7 Gbps	2.4 GHz, 5 GHz y 60 GHz	Corto
Wireless HD	25 Gbps	60 GHz	Corto
<b>Referencias</b>	(Granada Torres et al., 2011)		

## 6.2. Marco teórico

A continuación, se explican las generalidades más relevantes de este documento.

### 6.2.1. Sistemas de comunicaciones.

La función de un sistema de comunicaciones es transmitir información de un lugar a otro, ya sea separados por largas o por cortas distancias. Dicho transporte se realiza comúnmente a través de cables eléctricos u ópticos o aprovechando el espectro de radiofrecuencias empleando

una señal transportadora (portadora). La naturaleza física de esta portadora se ciñe al medio previamente seleccionado y su principal característica es que su frecuencia es variable desde algunos pocos megahertz hasta varios cientos de terahertz (Agrawal, 2010; Bishop, 2011)

Todos los sistemas de comunicaciones necesitan de una señal de información para funcionar y estos cuentan con al menos tres elementos fundamentales que son: Un transmisor, un canal o medio y un receptor, como se puede observar en la Fig. 2.

El proceso de comunicación es simple y comienza cuando la señal de información o en banda base (BB, *BaseBand*) es alimentada al transmisor, el cual envía estos datos de forma codificada a través del canal para luego ser recibida por el receptor y retransmitida al destino para cumplir con su función inherente (Frenzel, 2016).

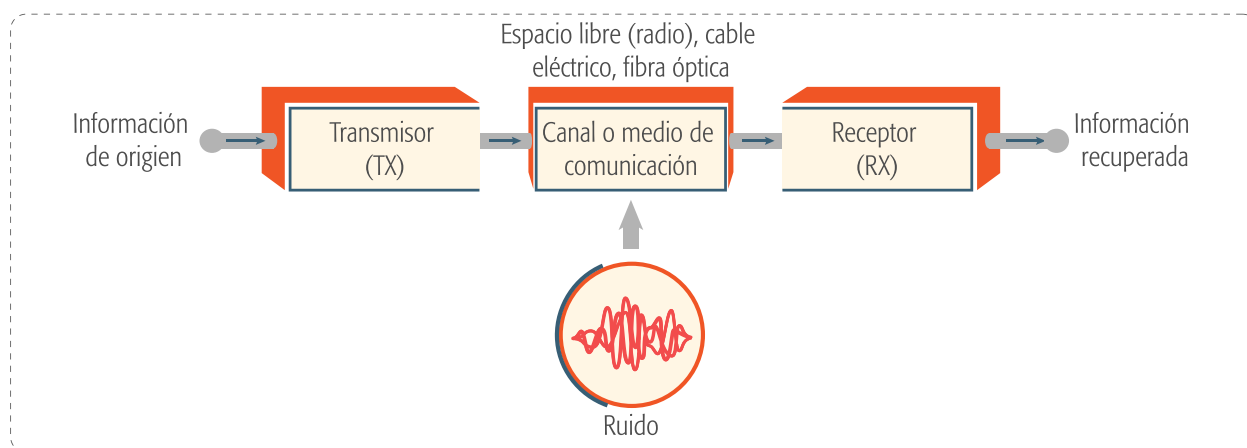


Fig. 2. Diagrama de bloques de un sistema de comunicaciones.

Cabe destacar que en todo tipo de comunicación, uno de los factores que más influye negativamente en la transmisión de la información es el ruido, ya que junto con las diferentes perturbaciones que sufre el mensaje al momento de ser transmitido a través de un canal, este degrada la información transmitida e interfiere con esta, vulnerando la calidad del mensaje enviado al usuario final (Frenzel, 2016).

## A. Transmisor

Para establecer cualquier tipo de comunicación se requiere convertir el mensaje de información en un formato adecuado para su transmisión por el canal de comunicación; este mensaje proviene de una fuente, la cual es el elemento que almacena u origina dicha información. A partir de esto, se puede clasificar la información como digital y analógica; la información digital se puede encontrar en discos magnéticos o memorias de computadores y tiene la característica de ir cambiando en incrementos discretos en el tiempo, mientras que la información analógica engloba al sonido, el color o la temperatura, entre otros, diferenciándose por variar continuamente en el tiempo. Independientemente de su naturaleza, no es práctico ni eficiente propagar esta información por medio de cables metálicos o a través de la atmósfera terrestre directamente, para lo cual se hace necesario enviar la información a través de un transmisor (Bishop, 2011; Frenzel, 2016; Tomasi, 2001).

Un transmisor es un conjunto amplio de elementos electrónicos y circuitos diseñados para permitir la correcta transmisión de un mensaje. Este está constituido generalmente por transductores, amplificadores, también moduladores y generadores de señal, tal como se muestra en la Fig. 3. (Frenzel, 2016).

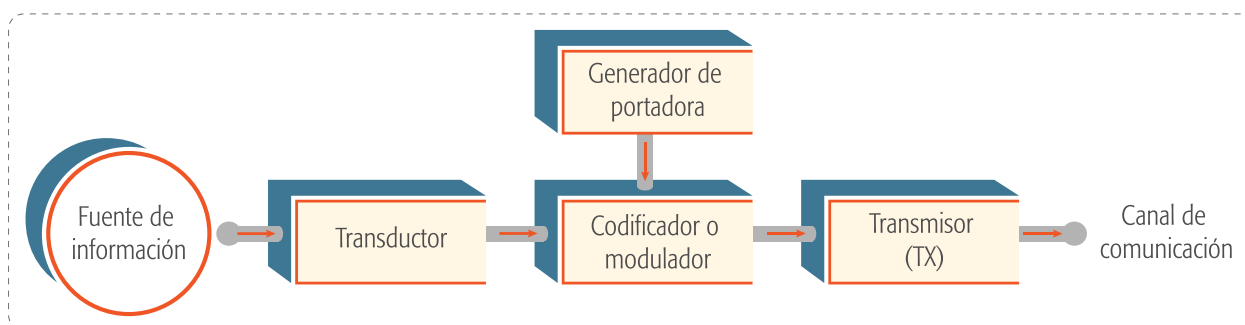


Fig. 3. Diagrama de bloques de un transmisor en un sistema de comunicaciones.

Es a través del transmisor que se produce la señal portadora, la cual corresponde generalmente a una señal sinusoidal o a un tren de pulsos que es modulada por una señal BB en

amplitud, en frecuencia o en fase, dando como resultado una señal compatible con el canal de comunicación por donde se quiere transmitir la información. Esta señal resultante es denominada *señal portadora modulada* (Frenzel, 2016; Tomasi, 2001).

Es importante resaltar que tales portadoras pueden ser moduladas de forma digital o analógica, de donde sobresalen las técnicas de modulación digital en amplitud y fase, ya que son las más utilizadas en los sistemas de comunicaciones actuales, por lo tanto, las que tienen mayor relevancia en este documento.

La Fig. 4 ilustra ambos tipos de modulación digital. Si la señal es variada en amplitud según los datos binarios de un tren de pulsos, se habla de Desplazamiento de Amplitud (ASK, *Amplitude Shift Keying*) como en la Fig. 4(a); en cambio, si la señal es alterada en fase de acuerdo a datos binarios, se estaría aplicando Desplazamiento de Fase (PSK, *Phase Shift Keying*) como en la Fig. 4(b). Un uso práctico para estas modulaciones se menciona en más adelante en la Fig. 8.

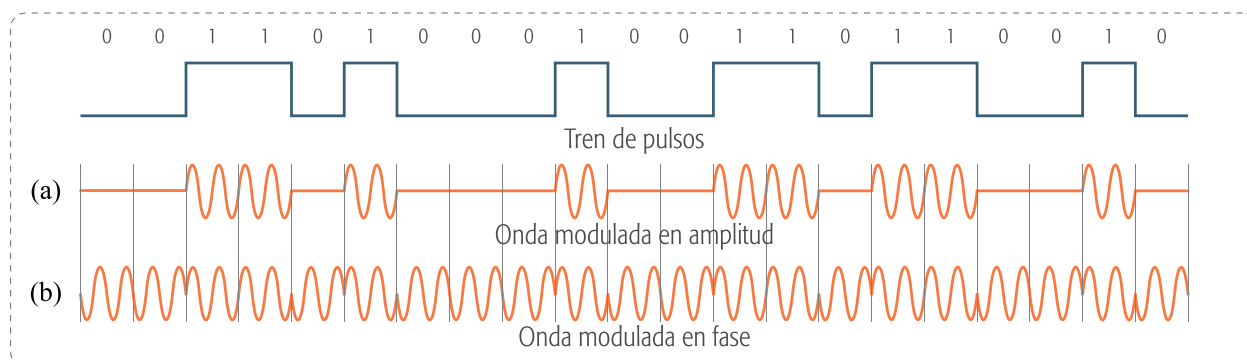


Fig. 4. Modulación digital. (a) Desplazamiento de amplitud, (b) Desplazamiento de fase.

## B. Canal de comunicación.

Diversos tipos de canales son usados para los sistemas de comunicaciones, ya que estos son el medio por el cual la señal portadora modulada proveniente del transmisor es transportada hacia la entrada del receptor (Frenzel, 2016).

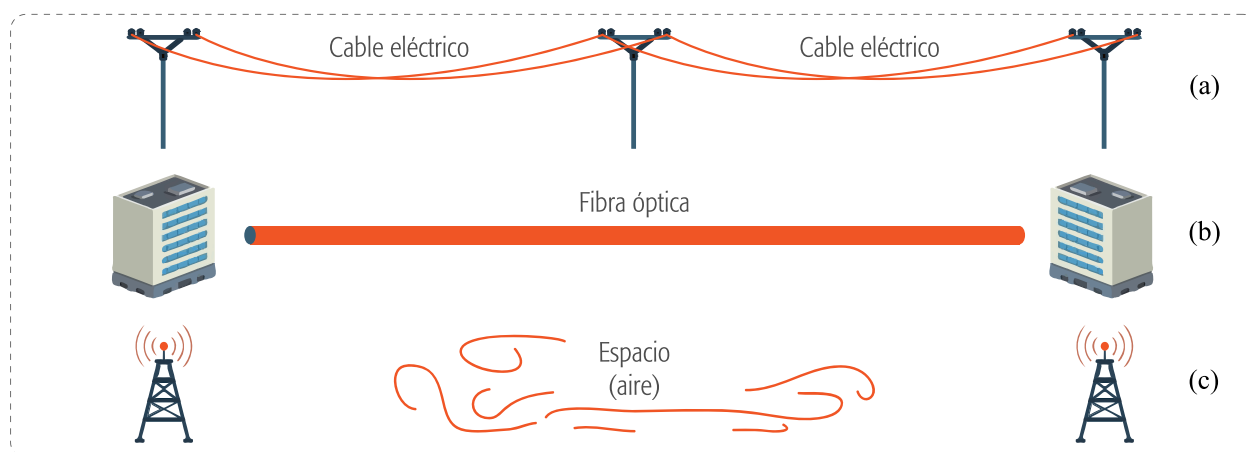


Fig. 5. Canales de comunicación. (a) Canal eléctrico, (b) Canal óptico, (c) Canal inalámbrico.

Los medios de comunicación más comunes están representados en la Fig. 5, la cual muestra que un medio eléctrico puede ser un cable coaxial regular que transporta una señal física de un punto a otro como en la Fig. 5(a), por ejemplo, la transmisión de un servicio de internet ofrecida por una empresa de telecomunicaciones. Por otro lado, si se habla de un medio óptico, como en la Fig. 5(b), debe emplearse un cable de fibra óptica, el cual transporta la información a través de señales de luz para lograr abarcar largas distancias y altas velocidades de transmisión. Por último, la Fig. 5(c) representa cualquier forma de comunicación inalámbrica de punto a punto donde el espacio es el medio predeterminado (Frenzel, 2016).

### C. Receptor

Finalmente, cuando la señal portadora modulada ha viajado a través del canal de comunicación, esta se dirige hacia el receptor, que al igual que el transmisor, es también un conjunto de componentes electrónicos y circuitos especializados que recogen la señal modulada y, aplicando el proceso inverso denominado *demodulación*, la convierten de vuelta a su formato original (Frenzel, 2016).



En el receptor se pueden encontrar amplificadores, osciladores, mezcladores, circuitos sintonizadores, filtros y por supuesto, un demodulador como se puede apreciar en la Fig. 6 (Frenzel, 2016).

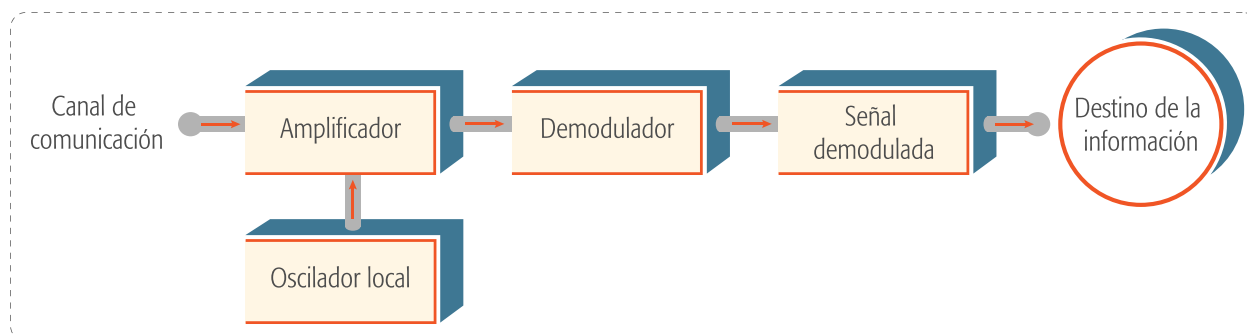


Fig. 6. Diagrama de bloques de un receptor en un sistema de comunicaciones.

### 6.2.2. Sistemas de comunicaciones ópticos.

Un sistema de comunicaciones óptico se apoya en el uso de señales de luz para transportar la información en BB usando longitudes de onda de portadora del orden de los nanómetros, las cuales están destinadas a abarcar la región espectral del infrarrojo cercano. A su vez, el uso de fuentes de luz es lo que permite ocupar frecuencias de portadora elevadas por lo que el ancho de banda disponible también es notablemente amplio (Agrawal, 2010; Tomasi, 2001).

Un sistema de comunicaciones óptico, tiene como función transmitir información de un punto a otro, solo que esta vez ocupando un tipo de canal óptico llamado *fibra óptica*; el transmisor y el receptor, por otro lado, deben cumplir con las necesidades específicas de dicho canal para que el sistema funcione correctamente (Agrawal, 2010). La Fig. 7 presenta un diagrama de bloques de un sistema óptico básico.

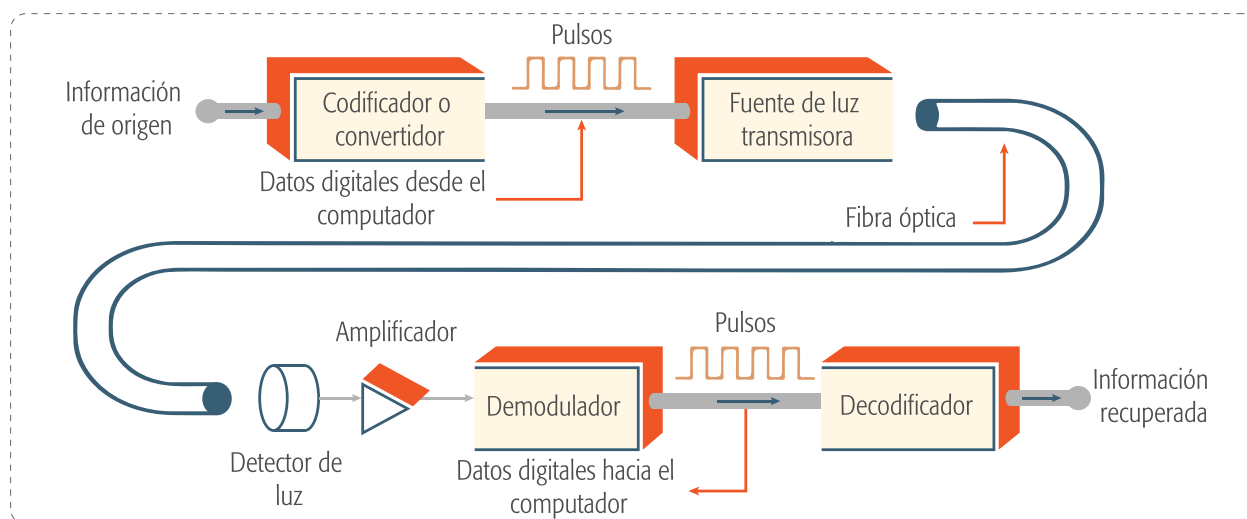


Fig. 7. Diagrama de bloques de un sistema óptico básico.

Inicialmente, se convierte la información en un formato compatible con el medio óptico por medio de un convertidor o codificador. Más adelante, ocupando un tren de pulsos se activa la fuente de luz transmisora la cual se enciende y se apaga rápidamente dando lugar a una modulación de tipo *on-off*. De esta manera, la información se envía por la fibra óptica y es atrapada por un detector sensible a la luz que convierte el mensaje en una señal eléctrica nuevamente, la cual posteriormente es amplificada y demodulada hacia una forma digital. Una vez recuperado el tren de pulsos inicial, este se decodifica dando lugar a la información original (Frenzel, 2016).

### A. Transmisor óptico.

En sistemas ópticos, el transmisor es el encargado de transformar la información en BB en un modelo óptico que permita su envío a través del canal. En este caso concreto, el transmisor está conformado por una fuente óptica, un modulador y un acoplador.

Una fuente óptica es usualmente un láser semiconductor o un diodo emisor de luz, ambos compatibles con el dominio óptico; el modulador es el encargado de variar la fuente de luz (señal portadora) por medio de la señal de información, dando como resultado una señal adaptada al canal óptico. A su vez, un acoplador que consiste en un microlente que direcciona la señal óptica al canal

procurando la mayor eficiencia posible (Agrawal, 2010). El medio óptico permite dos tipos de modulación en función de la aplicación, como se muestra en la Fig. 8.

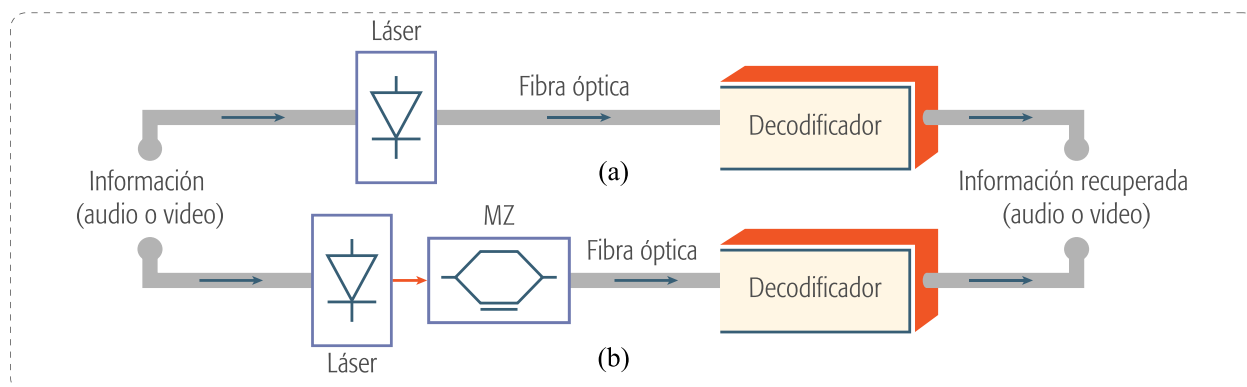


Fig. 8. Modulación en fibra óptica. (a) Modulación directa, (b) Modulación externa.

La modulación más ocupada actualmente es la de tipo on-off (OOK, *On-Off Keying*) o modulación directa en Fig. 8(a). Esta es la forma más sencilla de modulación ASK, pues consiste únicamente en encender y apagar un rayo láser de acuerdo con los datos binarios que se desean transmitir; sin embargo, es recomendable usar este tipo de modulación para velocidades de transmisión por debajo de unos cuantos Gbps. Por el contrario, si se requiere transmitir tramas de bits a velocidades superiores que 10 Gbps, es necesario optar por una alternativa conocida como modulación externa como se muestra en la Fig. 8(b), que consiste en un diodo láser que emite una señal óptica seguido de un dispositivo externo semiconductor adicional, el cual realiza la modulación requerida (Frenzel, 2016).

Es preciso aclarar que la modulación externa es la técnica de modulación que se va utilizar en este documento, por lo que es importante conocer de antemano que los moduladores externos más empleados son los basados en interferómetros de tipo Mach-Zehnder (MZ), cuyo funcionamiento consiste en un dispositivo formado por un divisor de señal compuesto por dos ramas de fibra óptica y un combinador. La guía de onda de entrada es dividida entre dos hacia las dos ramas del dispositivo, donde solo por uno de los brazos se aplica un PSK determinado por la

señal de información digital. Una vez las dos ondas son recombinadas, la diferencia de fase entre ambas señales es convertida en modulación de amplitud. El efecto conseguido produce una interferencia constructiva siempre y cuando la diferencia de fase entre las dos señales sea nula, de modo que se recupere la señal original produciendo un bit “1”, o destructiva, si la diferencia de fase entre las dos señales es un valor diferente de cero, por lo que se genera un bit “0”, caso en el que finalmente no se obtiene una señal óptica (Frenzel, 2016).

### B. Canal óptico.

Una fibra óptica se define como una guía de onda de material dieléctrico que trabaja a frecuencias ópticas, cuya función es transportar la información en forma de luz al mismo tiempo que direccionarla hasta su destino (Bishop, 2011).

Un canal de fibra típica cuenta con un núcleo, un revestimiento, un tubo protector o forro, una funda de kevlar y un enchaquetado generalmente de plástico, como se muestra en la Fig. 9.

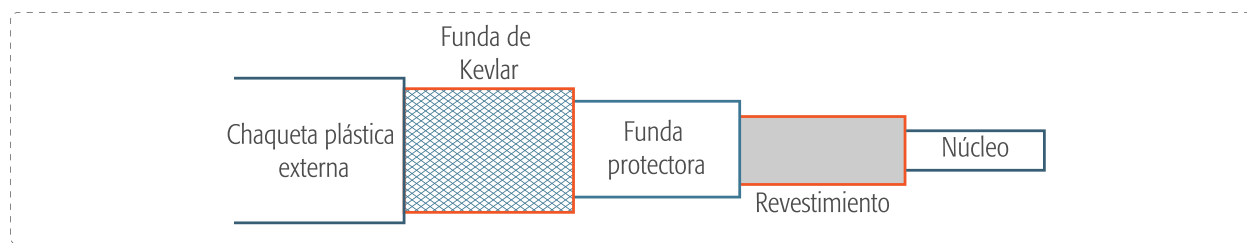


Fig. 9. Capas típicas en un cable de fibra óptica.

El núcleo de la fibra es usualmente construido a base de plástico o vidrio (sílice) y parte de tener un índice de refracción alto; el revestimiento es una capa que también puede ser de plástico o vidrio según su configuración y su principal función es mantener los haces de luz contenidos dentro del canal a causa de su índice de refracción bajo; la funda protectora o enchaquetado protege la fibra de las circunstancias del entorno donde va a ser aplicada; la funda de kevlar es una capa adicional que también protege la fibra de la contingencia; por último, la chaqueta exterior minimiza el daño físico referido a cortaduras o quebraduras (Bishop, 2011; Tomasi, 2001).

Por otro lado, un canal de comunicaciones adecuado debe garantizar la conducción de la información con la menor distorsión posible, es por esto que los canales de fibra óptica son idóneos puesto que pueden transmitir luz con pérdidas realmente bajas de hasta 0.2 dB/km y, así como las bajas pérdidas de transmisión hacen de la fibra óptica un medio de transmisión casi impecable, esta toma más fuerza al brindar una mayor capacidad de información; característica fundamental teniendo en cuenta la demanda de información actual. Es clara también la inmunidad que posee frente a interferencia electromagnética, cuyo potencial se ve reflejado en cuán estables son los sistemas ópticos en todo tipo de aplicación. Además, la buena respuesta de la fibra con respecto a durabilidad y susceptibilidad a daños, permite que también sea empleada en entornos hostiles (Tomasi, 2001).

Hay dos maneras de clasificar la fibra óptica: Por su *índice de refracción*, cuyo valor cambia a lo largo del material óptico, y por el *modo*. Ambas combinadas, definen las características de un cable de fibra óptica (Frenzel, 2016). La Fig. 10 ilustra las dos clasificaciones de la fibra según el modo.

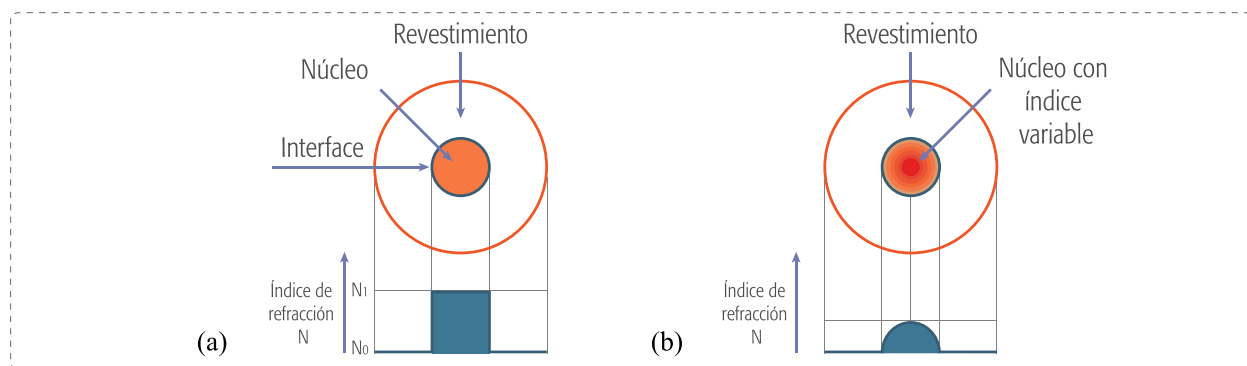


Fig. 10. Fibra óptica según su índice de refracción. (a). Fibra de índice escalonado, (b) Fibra de índice gradual.

Cuando se requiere definir una fibra óptica por su índice de refracción, existen de índice escalonado en la Fig. 10(a) y de índice gradual en la Fig. 10(b). La fibra óptica de índice escalonado (SI, *Step Index*) conserva un índice de refracción uniforme tanto en el núcleo como en el revestimiento; no obstante, el valor del primero es mayor que el del segundo. En cambio, en una

fibra óptica de índice gradual (GI, *Graded Index*), el índice de refracción del núcleo varía de menos a más desde su margen hasta el centro de forma gradual (Tomasi, 2001).

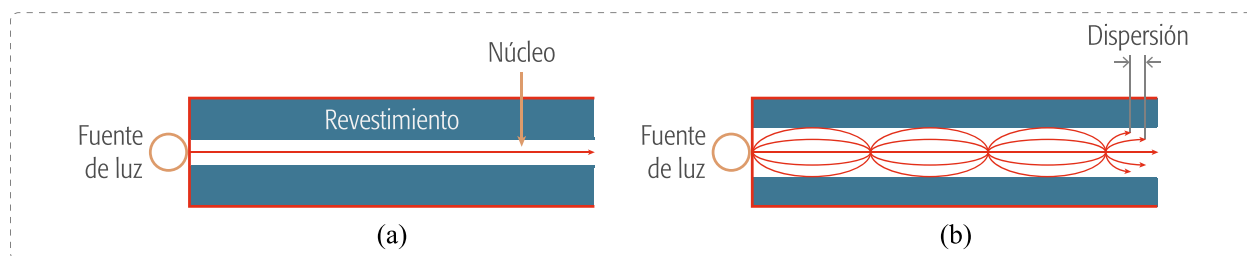


Fig. 11. Fibra óptica según su modo. (a) Fibra monomodo, (b) Fibra multimodo.

De forma paralela, cuando se aborda la terminología de los sistemas ópticos, el término *modo* (camino) determina cuántas trayectorias puede tomar un haz de luz a través de la fibra. Cada modo representa un patrón de líneas de campo electromagnético repetidas a lo largo de la fibra óptica, donde solo determinado número de modos son capaces de propagar información (Tomasi, 2001). Así, como con el índice de refracción, existen dos tipos de fibra según su modo como se muestra en la Fig. 11.

En una fibra monomodo, el núcleo posee tal estrechez que la luz solo puede propagarse en una dirección, lo que elimina el rebote de esta dentro de la fibra y, por lo tanto, otorga mayores velocidades de transferencia, Fig. 11(a). Por el contrario, una fibra multimodo abre paso al rebote de la luz a través de material, lo cual admite un mayor tráfico de haces de luz propagándose por el canal concediendo así más ancho de banda utilizable, pero conlleva a una menor velocidad de transferencia, Fig. 11(b) (Agrawal, 2010).

Como se mencionaba anteriormente, la combinación de ambas clasificaciones permite determinar las características de un cable de fibra óptica de donde se desprenden tres clases fundamentales: Fibra monomodo de índice escalonado, fibra multimodo de índice escalonado y fibra multimodo de índice gradual.

Adicionalmente, existen dos tipos de fibra monomodo que, por sus bajos coeficientes de dispersión, ganan relevancia en el desarrollo de este documento, los cuales son las Fibras Monomodo Estándar (SSMF, *Standard Single Mode Fiber*) y la Fibra con Desplazamiento de Dispersión Distinta de Cero (NZDSF, *Non Zero Dispersion Shifted Fiber*). Las fibras de tipo SSMF tienen como características principales una atenuación de unos 0.2 dB/km y una dispersión cromática de 17 ps/nm·km a una longitud de onda de portadora de 1550 nm; sin embargo, a una longitud de onda de 1300 nm, se consigue una dispersión cromática nula a cambio de una atenuación casi del doble. Por otro lado, las fibras de tipo NZDSF son una solución a los errores por dispersión cromática en las fibras SSMF llegando a valores muy bajos de unos 8 ps/(km·nm), en contraste alcanzando un coeficiente de atenuación mayor de 0.35 dB/km (Álvarez et al., 2011; Carrera & Jiménez, 2015).

### C. Efectos de propagación de la fibra óptica.

Las señales ópticas sufren efectos de propagación al ser enviadas por la fibra, causal de limitaciones importantes en el alcance de red, la potencia de transmisión e incluso en la tasa de transmisión de datos, lo que se traduce como una disminución del desempeño de las redes (Álvarez & Amaya, 2015; López et al., 2011). Los efectos de propagación de la fibra se clasifican en efectos lineales y no lineales donde se encuentran varios tipos, tal y como se expone en la Fig. 12.

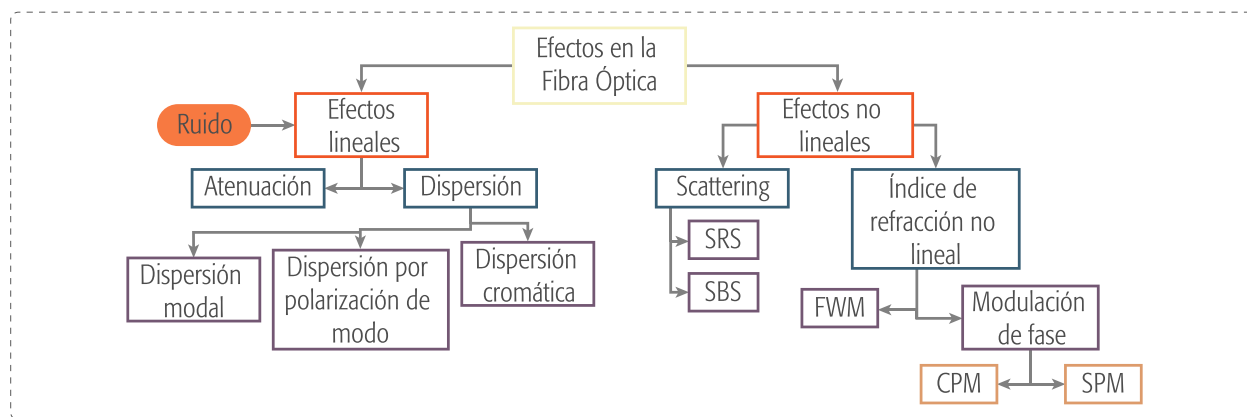


Fig. 12. Efectos de propagación de la fibra óptica.

Los efectos lineales tienen como característica principal que son ocasionados por los componentes pasivos de la fibra óptica, entre los que se encuentran el tipo de fabricación, los empalmes de cables y conectores, o fuentes externas ajenas al sistema óptico como el ruido, mientras que los efectos no lineales dependen exclusivamente de la intensidad de la señal transmitida (Tomasi, 2001).

Adicionalmente, los efectos lineales se hacen más notorios a medida que aumenta la velocidad de transmisión por el canal óptico, donde los niveles de potencia manejados son también muy altos.

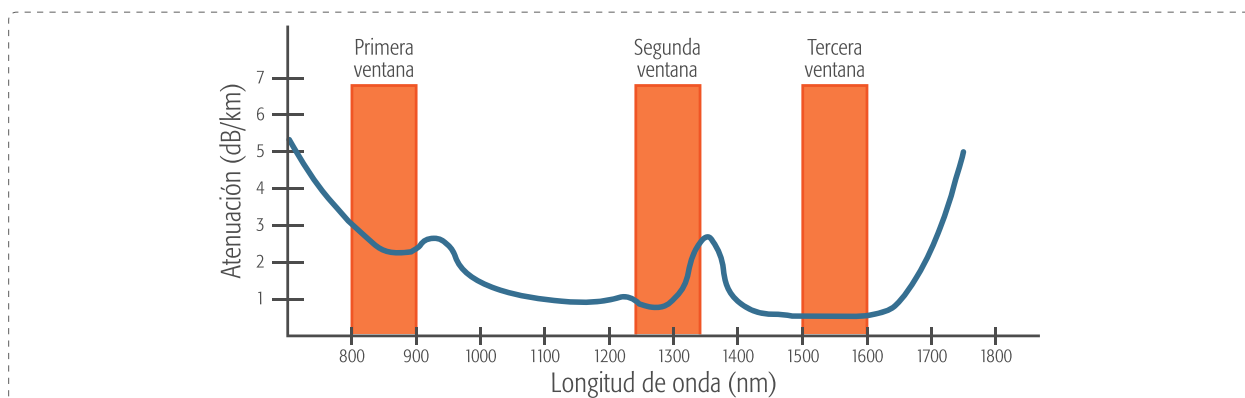
#### 1) Efectos lineales.

Entre estos se encuentran: Atenuación, Dispersión Modal (MD, *Modal Dispersion*), Dispersión Por Polarización del Modo (PMD, *Polarization Mode Dispersion*) y Dispersión Cromática (CD, *Chromatic Dispersion*) (Agrawal, 2013).

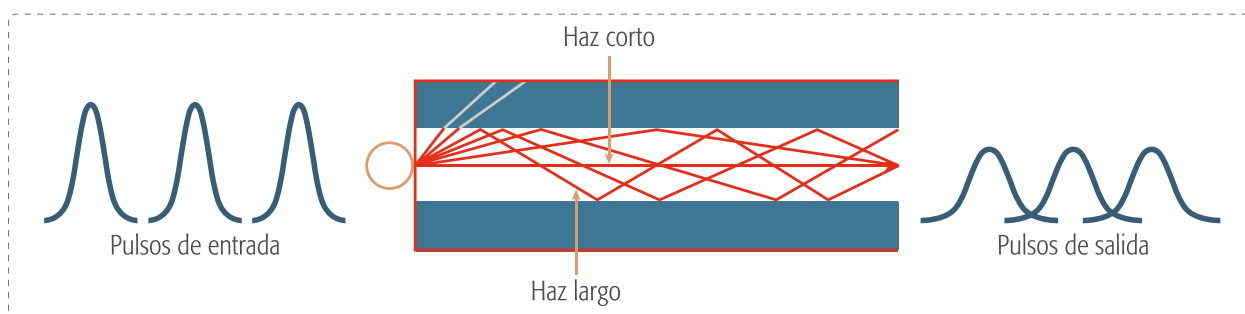
La atenuación es la disminución de la potencia de la señal óptica a medida que es transmitida por la fibra; este efecto ocurre tanto para fibras monomodo como para multimodo, para lo cual están designadas porciones del espectro lumínico denominadas *ventanas* con el fin de ofrecer un camino con menos atenuación para la señal óptica, como se muestra en la Fig. 13 (Agrawal, 2013).

La dispersión, por otro lado, es la separación de las componentes de frecuencia de una señal óptica en el tiempo, y se divide entre los tres tipos mencionados anteriormente.

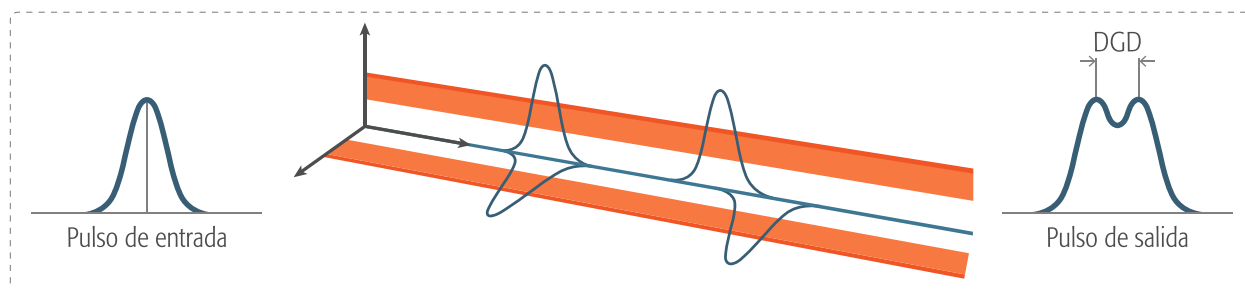




La MD se presenta solo en fibras multimodo, y se debe a que los modos por donde se propagan los pulsos no recorren la misma distancia entre sí, de tal forma que llegan al receptor en distintos instantes de tiempo, donde se solapan creando Interferencia Intersimbólica (ISI, *Intersymbol Interference*), como se puede apreciar en la Fig. 14 (Álvarez & Amaya, 2015).



La PMD se debe a imperfecciones en la fibra, las cuales causan que las componentes espectrales de luz que se supone viajan a la par, terminen viajando a diferentes velocidades causando retardo de grupo diferencial (DGD, *Differential Group Delay*), en Fig. 15.



Finalmente, la CD es un fenómeno de ensanchamiento de pulso debido a que las diferentes componentes espectrales contenidas en cada pulso enviado a través de la fibra, llegan al destino en diferentes tiempos, tal y como se muestra en la Fig. 16 (Agrawal, 2013).



Fig. 16. Ensanchamiento de pulso por dispersión cromática en la fibra óptica.

A partir del efecto de la CD, también aparece ISI, ya que uno o más símbolos interfieren con otros causando ruido o una señal menos confiable. Este fenómeno produce una mezcla de símbolos que reduce la claridad de una señal, haciendo que el receptor se comporte de manera errónea y arroje información inexacta. Este efecto se puede apreciar en la Fig. 17 (Yang, 2018).

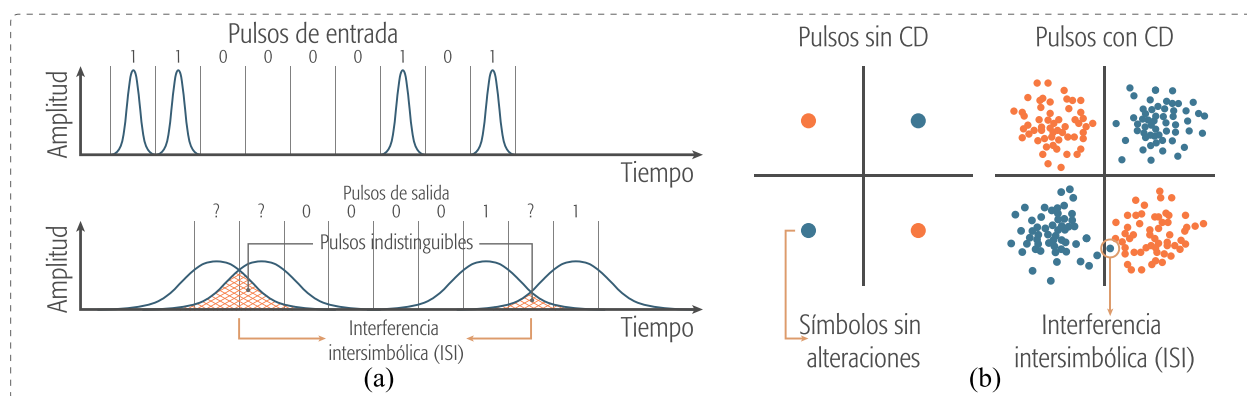


Fig. 17. Efecto de la ISI debido a la CD. (a) ISI visto en un tren de pulsos, (b) ISI visto desde un diagrama de constelaciones.

Tal y como se puede observar en la Fig. 17(a), la CD no solo produce un retraso temporal importante sobre el tren de pulsos enviado, sino que también genera problemas cuando dos pulsos son enviados simultáneamente, pues hace que estos sean indistinguibles por parte del receptor, dando como resultado ISI; adicionalmente, cada bit "1" o "0" tiene un tiempo de bit fijo delimitado en la figura por las líneas verticales equidistantes. Como se puede apreciar, en los pulsos de entrada, la amplitud de cada uno está correctamente distribuida en el tiempo de bit, mientras que

en los pulsos de salida dicha energía se ensancha, invadiendo los tiempos de bit de los símbolos adyacentes. Por lo tanto, cuando hay un bit "0" en medio de dos bits "1", en este habrá energía de los símbolos adyacentes, para lo cual el receptor podría interpretar el dato como un "1", generando un error.

Por otro lado, la Fig. 17(b). ilustra dos diagramas de constelación: El diagrama de la izquierda, representa un caso ideal donde no existe dispersión cromática, mientras que en el diagrama derecho sí se presenta, ya que los puntos de la constelación evidencian dispersión entre sí, al igual que se observa ISI, debido a que un símbolo ha sido desplazado a un cuadrante adyacente.

La Fig. 18 presenta las gráfica de las curvas de MD, CD y PMD para una fibra óptica monomodo tipo estándar de donde se aprecia, entre otros comportamientos, que para una fibra óptica monomodo, el cero de CD se presenta a  $\sim 1310$  nm, mientras que para 1550 nm tiene un valor aproximadamente de 17 ps/nm·km (Agrawal, 2013).

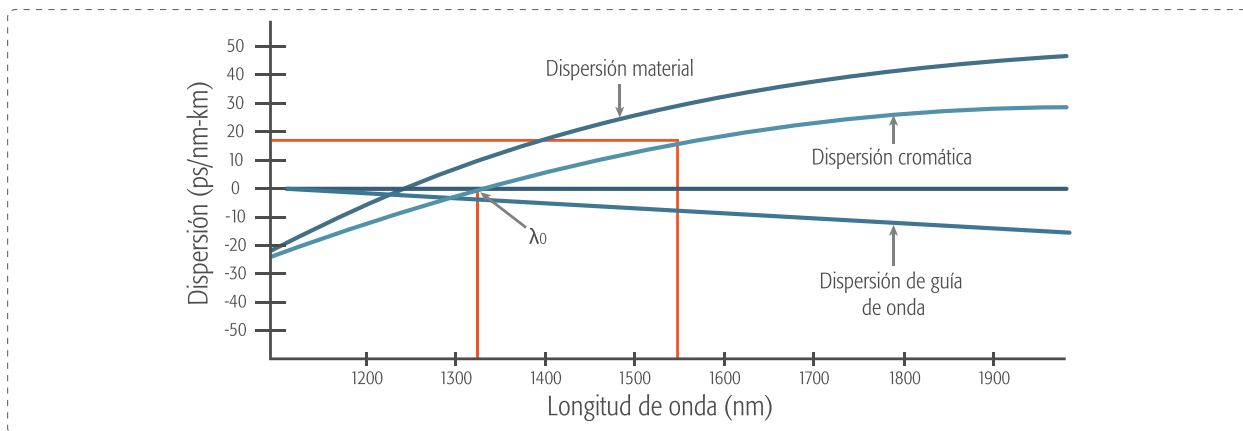


Fig. 18. Gráfica de dispersión en la fibra óptica.

## 2) Efectos no lineales.

En los efectos no lineales se encuentran: Modulación de Fase Inducida (SPM, *Self Phase Modulation*), Modulación de Fase Cruzada (XPM, *Cross Phase Modulation*), Mezcla de Cuarta

Onda (FWM, *Four Wave Mixing*), Dispersión Estimulada de Raman (SRS, *Stimulated Raman Scattering*) y Dispersión Estimulada de Brillouin (SBS, *Stimulated Brillouin Scattering*) (López et al., 2011).

La SPM está relacionada con el índice de refracción de la fibra, pues este contiene un componente que depende de la intensidad de la señal; tal índice de refracción no lineal produce un desplazamiento de fase proporcional a la intensidad de pulso, por lo que un mismo pulso puede ser desplazado en fase en diferentes puntos como aparece en la Fig. 19 (López et al., 2011).

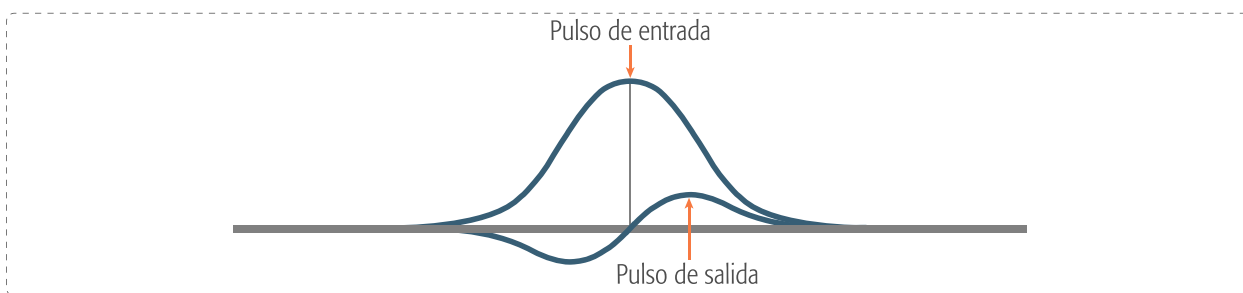


Fig. 19. Efecto de la Modulación de Fase Inducida en la fibra óptica.

En cuanto a la XPM, cuando dos o más modos ópticos son transmitidos al mismo tiempo por medio de la fibra, se produce modulación (cruzada) entre ellos puesto que el efecto de refracción no lineal descrito en la SPM ahora es inducido por más modos a la vez, produciendo el mismo desplazamiento de fase pero intensificado de acuerdo con el número de modos empleados (López et al., 2011). De esta forma, se pueden englobar ambos efectos, –SPM y XPM– dentro de los efectos de modulación de fase no lineales.

Paralelamente, la FWM se da cuando dos o más señales ópticas de frecuencias centrales diferentes son transmitidas por el medio óptico, de modo que se producen nuevas componentes de interferencia de señal óptica a causa de la relación entre el índice de refracción no lineal con la potencia de la señal descrita en la definición de CD, generándose entonces un medio de propagación no lineal que a su vez permite la mezcla de dichas señales.

Es importante resaltar que la FWM se produce cuando se utiliza la tecnología de Multiplexación por División de Longitud de Onda (WDM, *Wavelength-division Multiplexing*), la cual garantiza que las señales de datos puedan ser divididas entre señales salientes individuales destinadas a múltiples usuarios (Agrawal, 2010).

El escenario descrito se ilustra en la Fig. 20, donde se involucran tres señales de distintas frecuencias centrales  $f_1$ ,  $f_2$  y  $f_3$  cuyas componentes ópticas de interferencia generadas por FWM se incrementan casi exponencialmente debido al aumento en el número de canales. Los efectos descritos están relacionados directamente con el índice de refracción no lineal de la fibra óptica.

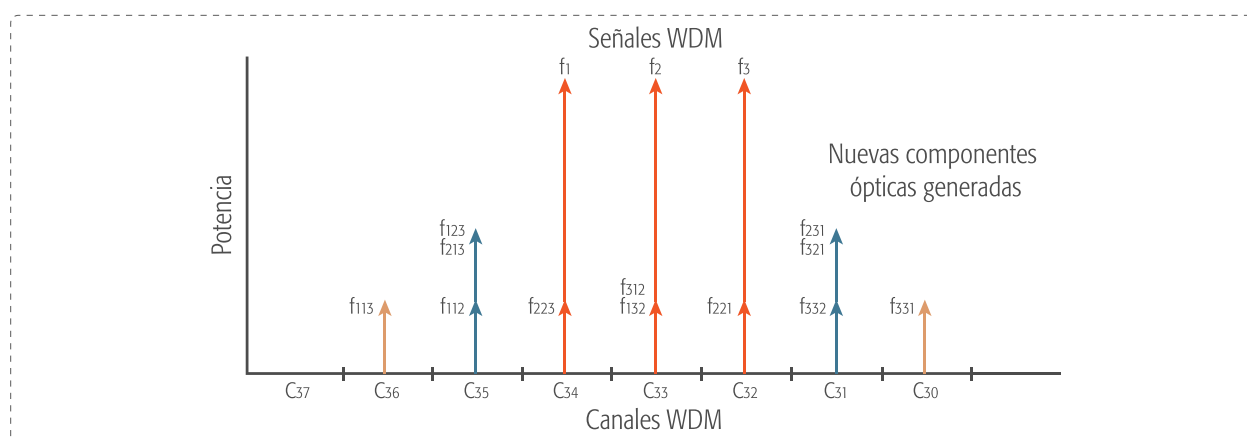


Fig. 20. Efecto de la Mezcla de Cuarta Onda en la transmisión por fibra óptica.

Por otra parte, los efectos SRS y SBS son efectos de *scattering* o dispersión no lineal ya que existe transferencia de energía entre canales de distintas frecuencias.

La SRS genera transferencia de potencia desde una señal de mayor frecuencia hacia una de menor frecuencia llamada *Onda de Stokes*, siempre y cuando haya presencia de potencia en ambos canales (modos), como se observa en la Fig. 21 (López et al., 2011).

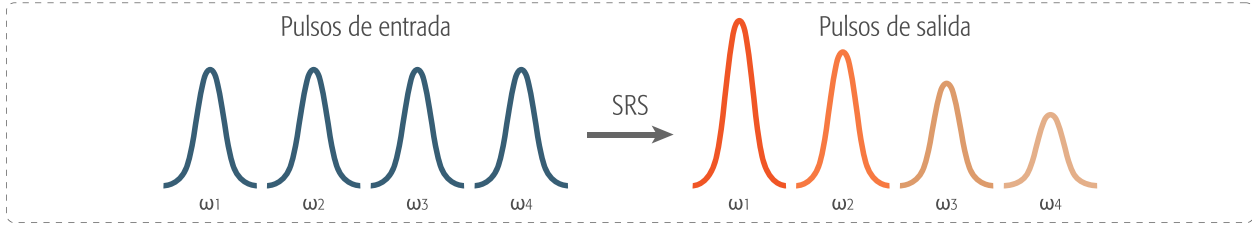


Fig. 21. Efecto de la Dispersión Estimulada de Raman en la fibra óptica.

Se evidencia que el canal de salida de mayor frecuencia  $\omega_4$ , presenta menor potencia con respecto a los demás canales debido al efecto SRS; caso contrario del canal de menor frecuencia  $\omega_1$  que posee una mayor potencia producto de la recepción de potencia por parte de los demás canales. Cabe destacar que la Onda de Stokes en este caso puede viajar en la misma dirección o en dirección contraria que la señal que transfiere potencia.

Por último, la SBS es un efecto que resulta de la interacción entre la señal óptica y el material de la fibra cuando se emplean altas frecuencias. Esta correlación comprende la onda incidente, la onda dispersada y los fonones involucrados y, a diferencia del efecto de SRS, la SBS requiere que la Onda de Stokes se dirija en dirección contraria a la señal predominante (Miah & Potter, 2017).

#### D. Modelo matemático de la fibra óptica.

Si se quiere simular los efectos lineales y no lineales que inciden en un haz de luz transportado a lo largo de una fibra óptica, se debe solucionar la Ecuación No Lineal de Schrödinger (NLSE, *Nonlinear Schrödinger Equation*). A partir de las ecuaciones de Maxwell, algunas consideraciones sobre la naturaleza de la fibra y un proceso que involucra transformadas de Fourier, se puede llegar a la NLSE generalizada, la cual se muestra en la ecuación (1) (Peralta-Sevilla et al., 2014; Vázquez et al., n.d.).

$$\frac{\partial A}{\partial z} + \frac{\alpha}{2} A + \beta_1 \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{i}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} - \frac{1}{6} \beta_3 \frac{\partial^3 A}{\partial t^3} = i\gamma |A|^2 A \quad (1)$$

En esta ecuación, la derivada de primer orden de la amplitud de la potencia con respecto al tiempo, es la dispersión ( $\beta_1$ ); la de segundo orden, es la dispersión por velocidad de grupo ( $\beta_2$ ); y la de tercer orden, es la dispersión por velocidad de grupo de altos órdenes ( $\beta_3$ ). Además,  $\partial A/\partial t$  representa la variación de la amplitud de la potencia de la señal óptica con respecto a la longitud de la fibra, y  $\alpha A/2$  afecta a dicha amplitud, de acuerdo al coeficiente de atenuación  $\alpha$  del canal óptico. Al otro lado de la igualdad, se encuentra la SPM, en la cual  $\gamma$  es el coeficiente no lineal para la fibra óptica (Peralta-Sevilla et al., 2014; Vázquez et al., n.d.).

### E. Receptor óptico.

A diferencia de cualquier otro tipo de receptor, uno de carácter óptico necesita tener una sensibilidad muy alta y la capacidad para operar a muy altas frecuencias para poder convertir la señal de información proveniente de la guía de onda en un formato eléctrico. Quizá el elemento más importante de un receptor óptico es el fotodetector, entre los que se encuentran fotodiodos PIN y fotodiodos avalancha, como se muestra en la Fig. 22.

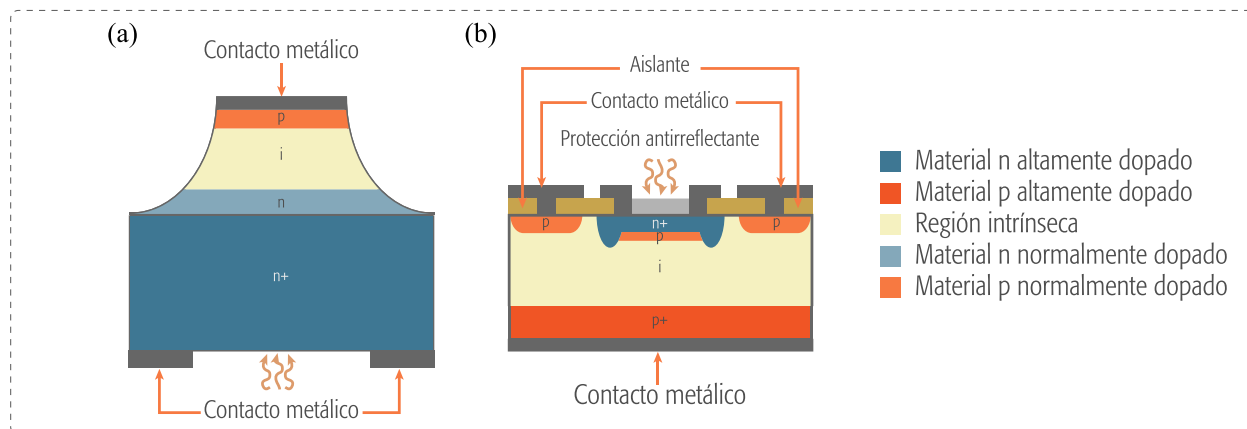


Fig. 22. Fotodetectores. (a) Diodo PIN, (b) Diodo avalancha.

En un fotodiodo, la corriente circula de manera inversa a como sucede con los diodos normales; esto permite que se genere un aumento de corriente cuando el fotodiodo es excitado con luz y, en contraste, que la corriente sea muy pequeña cuando haya ausencia de esta.

Los fotodiodos PIN como el que se encuentra en la Fig. 22(a) surgen por la necesidad de acelerar aquellos pares electrón-hueco generados en la zona de unión de la juntura PN, cuyos estados terminan recombinándose nuevamente antes de alcanzar los terminales del dispositivo, de forma que se incluye una nueva zona intrínseca I entre las zonas P y N y se reduce la anchura de estas de manera que se optimiza el transporte de energía a través del aumento de la intensidad de campo eléctrico de la zona de juntura (Agrawal, 2010).

De manera similar funcionan los diodos avalancha en la Fig. 22(b), a diferencia que trabajan con voltajes inversos mayores que cualquier otro fotodiodo, lo que posibilita a los portadores de carga ser multiplicados en la zona de avalancha del diodo, incrementando así la respuesta del dispositivo producto de dicha ganancia interna (Frenzel, 2016).

#### **F. Tecnologías de Redes Ópticas Pasivas (PON).**

Las aplicaciones donde más se ocupa la fibra óptica corresponden a las redes de zona amplia como el servicio de telefonía de larga distancia o el eje troncal de Internet; sin embargo, con el avance de la tecnología óptica las velocidades de transmisión han ido en aumento; es entonces donde la nueva y creciente tecnología PON se ha posicionado para abarcar mayormente las redes de áreas metropolitanas. Dicha tecnología es también denominada como Fibra Para el Hogar (FTTH, *Fiber to the Home*), o en general como *FTTx*, donde la *x* representa el destino de la fibra (Frenzel, 2016).

Comúnmente, las redes de fibra óptica básicas usan un sistema activo para poder ejecutar la transmisión de información de un punto a otro, lo cual ha conllevado desde los inicios de la fibra a que estos rondan precios elevados, ya que se necesita un compendio extenso de elementos activos que van desde transductores, repetidores, e incluso amplificadores para finalmente evitar los errores por atenuación que sufre la información al ser transportada por largas distancias. Una



solución a este problema que se ha posicionado en los últimos años son las PONs, cuyo componente pasivo implica el uso nulo de elementos activos como los ya mencionados y en cambio emplea elementos pasivos como *splitters* y combinadores ópticos. De esta manera, destinándose el presupuesto a usar un canal óptico de baja atenuación, láseres de alta potencia y receptores de gran sensibilidad, se pueden lograr distancias de transmisión de decenas de kilómetros sin intervención de elementos activos (Aguirre et al., 2015). La Fig. 23 muestra la topología básica de la tecnología PON.

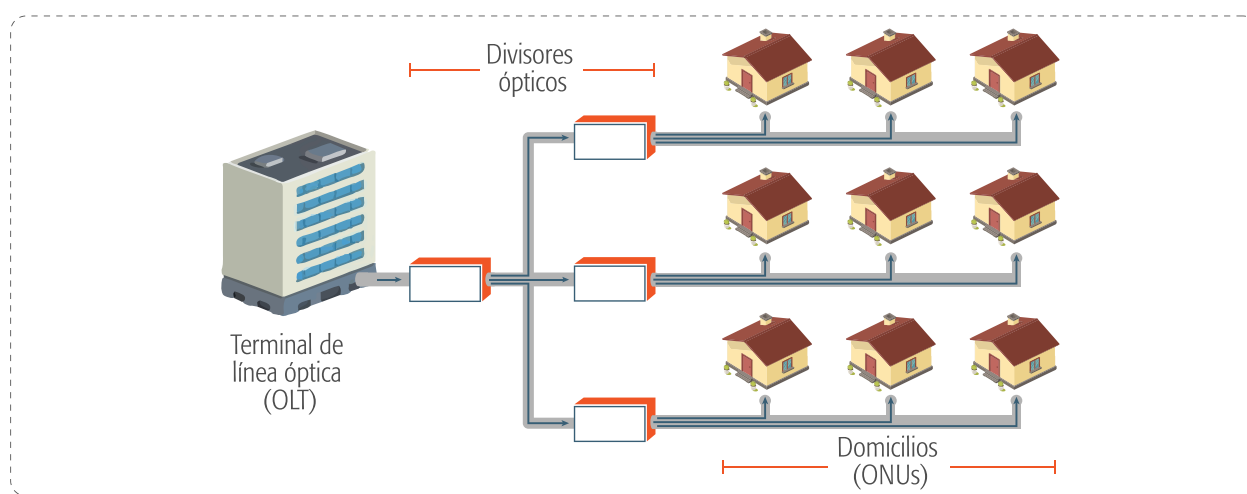


Fig. 23. Topología básica de la tecnología PON.

En la imagen se visualiza la Terminal de Línea Óptica (OLT, *Optical Line Terminal*), que es el elemento más importante de la red, la cual provee una interfaz entre el núcleo de la red y la red PON; esta está situada en el operador de intercambio local denominado tradicionalmente como la compañía de telefonía (Kumar et al., n.d.).

Más adelante se encuentra el Divisor Óptico (Splitter), el cual es un dispositivo óptico de una entrada y varias salidas que utiliza la Multiplexión por División de Tiempo (TDM, *Time-Division Multiplexing*) en el enlace de bajada o el Acceso Múltiple Por División de Tiempo (TDMA, *Time Division Multiple Access*) en el enlace de subida. Estos pueden ser ubicados en cualquier lugar entre el OLT y la localidad del usuario (Kumar et al., n.d.).

Finalmente, las Unidades de Red Ópticas (ONU, *Optical Network Units*) proveen al usuario una interfaz de la red y son implementadas por el proveedor de servicios. Generalmente, las ONUs también agregan información que es enviada nuevamente a la OLT haciendo de esta una comunicación bidireccional. Las ONUs además de ser enlazadas por fibra óptica, también pueden ser instaladas haciendo uso de varios medios de transmisión como el cable de par trenzado, el cable coaxial y el Wi-Fi (“5G Wireless Fronthaul Requirements in a Passive Optical Network Context,” 2019).

En cuanto a la evolución histórica de la tecnología PON, en 1995, la FSAN (Full Service Access Network) define APON como el primer estándar de la tecnología PON, el cual basaba su transmisión en el protocolo ATM (Asynchronous Transfer Mode) y contaba con una tasa máxima de 155 Mbps. Cuatro años más tarde, en 1999, este estándar fue mejorado para soportar 622 Mbps de velocidad de transferencia junto con un ancho de banda dinámico para permitir aplicaciones como acceso a Ethernet y transmisión de video. Más adelante, en 2004, se propuso un estándar que pudiera correr a velocidades de transmisión de hasta 1 Gbps orientado a multiservicios, lanzándose así la tecnología GPON, la cual permite comunicación por voz, Ethernet y ATM, entre otros, así como una cobertura de hasta 60 km. Posteriormente, en 2012, se lanzó XG-PON que continuó con un patrón de aumento en la velocidad de transmisión llegando hasta 10 Gbps, pero sacrificando en gran medida su cobertura hasta los 20 km; formato que al igual que GPON, emplea el protocolo TDM. Finalmente, en 2014, se lanza WDM-PON la cual se diferencia en gran medida de los demás estándares, no solo por su elevada velocidad de transmisión de hasta 40 Gbps, sino porque emplea Multiplexación por División de Longitud de Onda como tecnología de envío de información (Effenberger et al., 2007; Millán, 2015).

### 6.2.3. Sistemas de comunicaciones inalámbricos.

Cuando el espacio es el medio de transmisión, se habla de un sistema de radio o sistema inalámbrico, cuyas comunicaciones se realizan a través del espectro radioeléctrico haciendo uso de las ondas de radio como señales portadoras.

Las señales que se transmiten por medio del espacio, al estar sujetas a las variaciones de este, pueden llegar a ser reflejadas, refractadas e incluso absorbidas; tal comportamiento no solo depende de las características físicas del entorno, sino también de la banda de frecuencias en la que se realice la comunicación. La Fig. 24 muestra un diagrama básico de un sistema de comunicaciones inalámbricas.

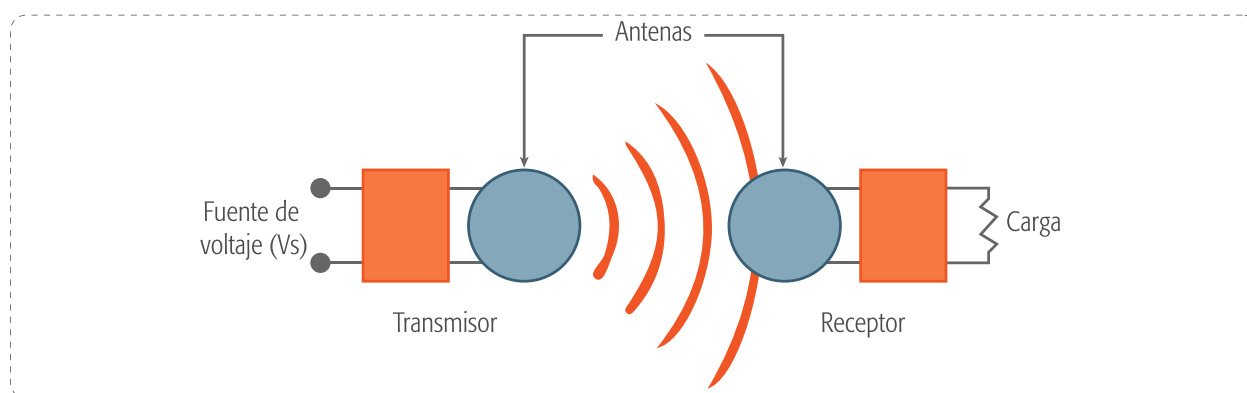


Fig. 24. Diagrama básico de un sistema de comunicaciones inalámbricas.

Una señal de Radio Frecuencia (RF, *Radio Frequency*) es enviada por un transmisor al medio inalámbrico y recibida por un receptor. La interface entre un transmisor, el medio y un receptor es la antena (Frenzel, 2016).

Una antena es un conductor o par conductor al cual se le es aplicado un voltaje a una frecuencia deseada. La antena es conectada al transmisor o al receptor por medio de la línea de transmisión o recepción respectivamente como se puede apreciar en la Fig. 25 (Frenzel, 2016).

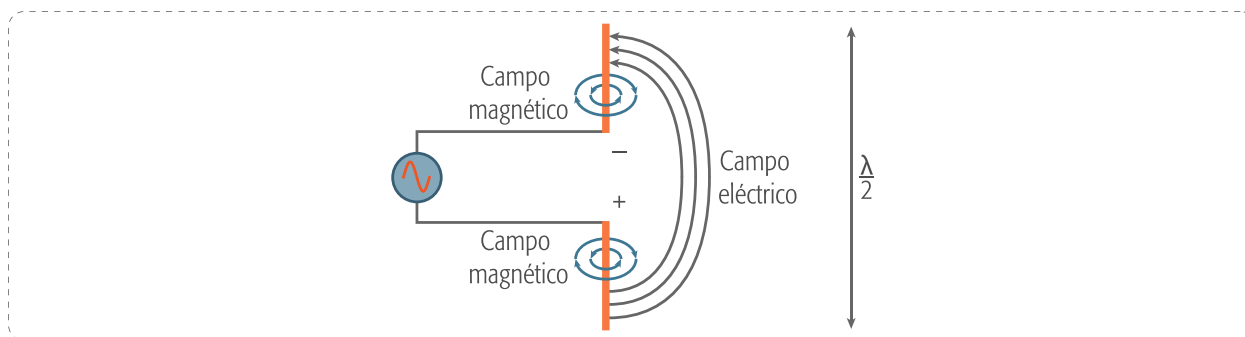


Fig. 25. Diagrama esquemático de una antena común.

Normalmente, cuando se trata de una antena transmisora, esta toma el voltaje del transmisor y lo convierte en una señal electromagnética; en cambio, si la antena es receptora, esta posee un voltaje inducido debido a la señal electromagnética que la está atravesando. Cabe destacar que en la mayoría de los sistemas inalámbricos la misma antena cumple con ambas funciones de transmitir y recibir, e incluso, ambas acciones las puede realizar en simultáneo (Frenzel, 2016).

Una de las ventajas más importantes de usar un sistema de comunicaciones inalámbrico es el gran alcance que llegan a tener los transmisores en RF llegando a recorrer varios kilómetros; además, su instalación tiende a ser menos costosa y sencilla y sobretodo, permite la conexión de una gran cantidad de usuarios con libertad de movimiento prescindiendo de redes cableadas. Es común también crear redes inalámbricas en lugares donde puede resultar incómoda o dificultosa una instalación cableada, lo que lo convierte en una alternativa importante que puede complementar o reemplazar un sistema de comunicación cableado.

### A. Sistemas de comunicaciones móviles.

La tecnología inalámbrica más relevante hoy en día es la asociada con la red móvil, ya que esta ha cambiado la forma en que nos comunicamos. Una red celular provee un servicio de radio de dos vías desde lugares remotos y además permite dividir el área de servicio en pequeñas áreas denominadas *celdas* (Cells), lo cual hace que la red celular sea muy robusta.

Además de la red celular, existen muchos otros sistemas inalámbricos como el Bluetooth o el NFC, los cuales son generalmente de corto alcance. Dentro del contenido de este documento solo se hará énfasis en la red inalámbrica LAN (*local-area network*), ampliamente conocida como Wi-Fi, puesto que a lo largo de los años ha pasado de ser una tecnología que permite transferir información inalámbricamente a convertirse en una necesidad básica para el ser humano.

Una red inalámbrica consta de un punto de acceso (AP, *Access Point*) que permite la conexión a internet y los dispositivos (clientes) asociados como se puede apreciar en la Fig. 26. Dicho punto de acceso crea un “cableado” inalámbrico que puede conectar tanto a los clientes entre sí como a los clientes con la red cableada (Fette, 2009).

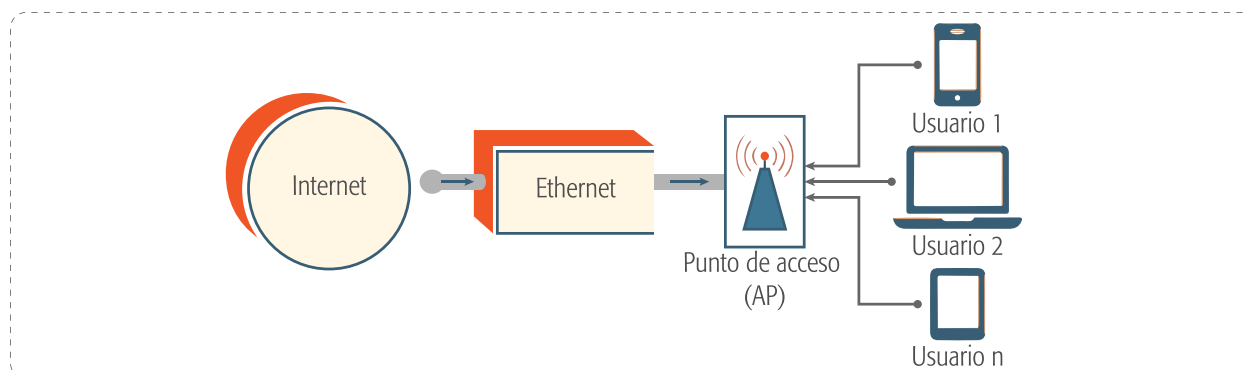


Fig. 26. Topología básica de una red inalámbrica.

Debido al considerable crecimiento de la demanda de la tecnología móvil, surgen los Sistemas de Radio sobre Fibra (RoF, *Radio over Fiber*) como alternativa para mejorar la capacidad de la infraestructura de comunicaciones actual que cada día exige un tráfico de datos mayor, lo cual figura como una problemática que exige pronta solución en el marco de las redes de comunicaciones (Aguirre et al., 2015).

#### 6.2.4. Sistemas de comunicaciones de RoF.

Las limitaciones en las comunicaciones de datos impuesta por el creciente número de usuarios en la red, han llevado a generar una serie de soluciones que van desde disminuir el tamaño

de las áreas de servicio (celdas) para albergar a más usuarios, hasta utilizar nuevas bandas de operación. Sin embargo, estas soluciones traen consigo otra serie de problemas, puesto que por un lado, hacer celdas de menor tamaño requiere que más de estas sean puestas en funcionamiento para cubrir el área total de cobertura, y, por el otro, el uso de nuevas bandas de operación implica costos de instalación y mantenimiento (Zin et al., 2010). Es por esto que las redes ópticas-inalámbricas han evolucionado en los últimos años y están siendo ampliamente utilizadas en varias aplicaciones que involucran el mejoramiento del desempeño de redes y el desarrollo de redes móviles para su uso en interiores y exteriores. Esta convergencia proporciona un servicio fiable tanto para usuarios fijos como móviles y actualmente está abriendo el camino a los nuevos desarrollos de la tecnología Radio-sobre-Fibra.

Los sistemas RoF utilizan enlaces de fibra óptica para distribuir información en forma de señales de RF para llegar a los usuarios. En el enlace de bajada (downlink), los datos se modulan utilizando portadoras de radiofrecuencia y se transportan a través de un enlace de fibra óptica desde una Oficina Central (CO, *Central Office*) a varias Estaciones Base (BS, *Base Stations*) desplegadas en zonas urbanas. Una vez que los datos son recibidos en las BSs, estos son amplificados y luego transmitidos a los usuarios a través de la trayectoria inalámbrica como se muestra en la Fig. 27. En el enlace de subida (uplink), la transmisión se realiza de forma similar pero esta vez transportando los datos desde las BSs hasta la CO.

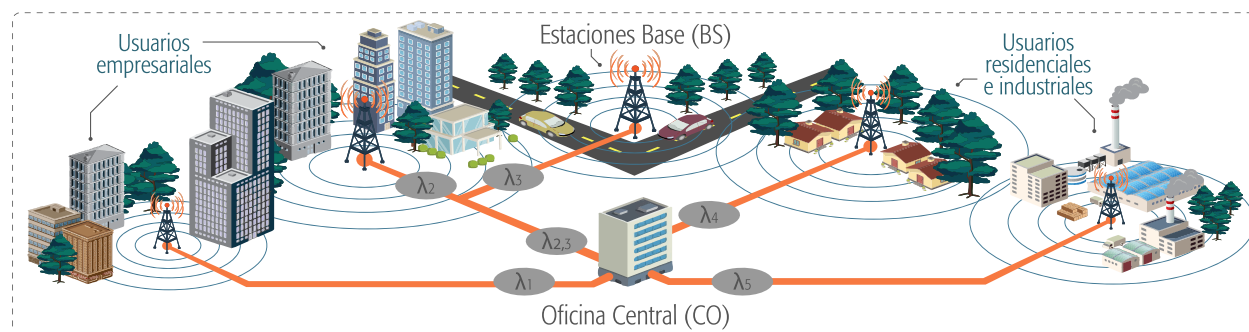


Fig. 27. Escenario de transmisión RoF.

RoF generalmente combina dos tecnologías clave: La Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales (OFDM), la cual es un caso especial de transmisión mutiportadora que consiste en enviar información dividiendo el ancho de banda total de esta en un número determinado de subportadoras ortogonales (Asplund et al., 2020) y la Modulación de Intensidad con Detección Directa (IM/DD, *Intensity Modulation/Direct Detection*), empleada para transformar las señales OFDM al dominio óptico y transportarlas por la fibra para su posterior transmisión por el canal inalámbrico. Por medio de estas dos tecnologías, se mejora considerablemente la eficiencia espectral y se logran altas tasas de transmisión. Un diagrama básico de transmisión IM/DD OFDM se muestra en la Fig. 28.

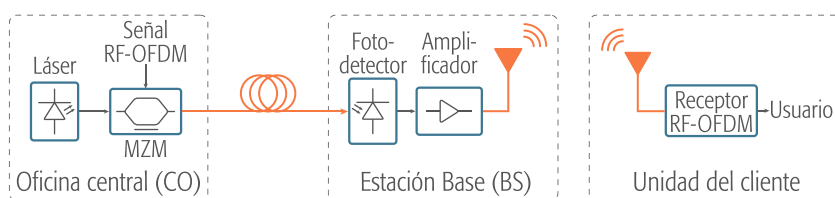


Fig. 28. Diagrama de bloques de la transmisión IM/DD en un escenario de RoF.

En la CO, la salida óptica generada por un láser es modulada en intensidad por la señal RF-OFDM mediante un dispositivo externo llamado Modulador Mach Zehnder (MZM). La señal óptica resultante se transmite entonces a través de una fibra monomodo (SMF). Una vez enviada a través del canal óptico, la señal es detectada por un fotodetector en la etapa de recepción de la BS. La señal inalámbrica es posteriormente amplificada en la BS y retransmitida a través del medio inalámbrico antes de llegar a las unidades de los clientes donde los datos son recuperados y finalmente enviados a los usuarios.

Por medio del método de transmisión IM/DD se ofrece beneficios a las empresas de telecomunicaciones en cuanto a baja complejidad de equipos, reducción de costos y flexibilidad operacional para el sistema general de comunicaciones. En paralelo, las redes ópticas pasivas (PON) acercan el soporte a los puntos de acceso a los usuarios residenciales y pueden utilizarse

como redes de retorno ópticas (backhaul) para redes de 5G aprovechando el gran aumento de ancho de banda RF, la baja atenuación y la inmunidad a las interferencias electromagnéticas que ofrece la fibra óptica.

### 6.2.5. Forma de onda OFDM para 5G NR.

En las especificaciones técnicas versión 15, el 3GPP adoptó la OFDM como la principal forma de onda para soportar 5G NR. En la literatura (Zaidi et al., 2016), por ejemplo, se evalúa la OFDM para una variedad de indicadores clave de rendimiento, incluyendo la eficiencia espectral, la robustez para canalizar la selectividad de frecuencia, la robustez contra el ruido de fase, entre otros, concluyendo que la OFDM es una elección prominente para 5G NR.

La Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonal (OFDM, *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) es un caso especial de transmisión multiportadora en el que una amplia banda de frecuencias se divide en varias bandas más chicas llamadas subportadoras. Estas subportadoras se utilizan para modular flujos de datos paralelos y deben cumplir con ser ortogonales para evitar la ICI. OFDM, junto con las señales de radiofrecuencia (RF, *Radio Frequency*), proporciona una forma muy eficaz de alcanzar altas velocidades de datos en los sistemas de RoF. Un diagrama de bloques de la transmisión RF-OFDM se muestra en la Fig. 29.

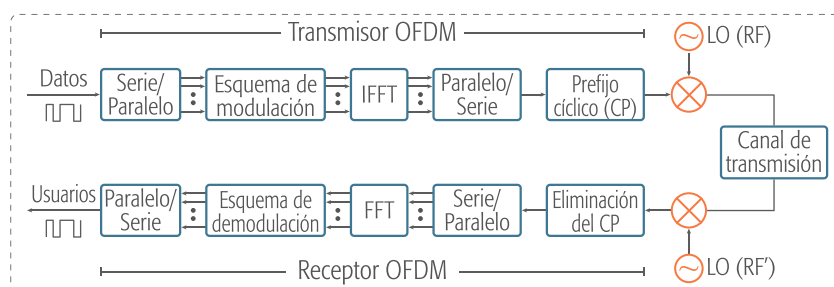


Fig. 29. Diagrama de bloques de la transmisión RF-OFDM.

De acuerdo con la figura anterior, los datos son convertidos de serie a paralelo y son mapeados usando un esquema de modulación determinado. Un bloque de Transformación Rápida



Inversa de Fourier (IFFT, *Inverse Fast Fourier Transform*) se utiliza luego para garantizar la ortogonalidad entre subportadoras, las cuales son después reordenadas en tramas de datos en serie. El Prefijo Cíclico (CP) se añade después de cada símbolo OFDM para proporcionar fiabilidad, protegiendo así los símbolos adyacentes de la dispersión por retardo que también da lugar a ICI y a ISI en este tipo de transmisiones. La señal OFDM es después modulada en frecuencia empleando un oscilador local (LO, *Local Oscillator*) y transmitida a través del canal de comunicación. En la etapa de recepción, la información se obtiene aplicando el proceso inverso descrito en la etapa de transmisión RF-OFDM.

### 6.2.6. Métodos de ecualización adaptativa.

En aplicaciones de telecomunicaciones, los filtros ecualizadores adaptativos se utilizan ampliamente ya que ajustan sus parámetros para cumplir objetivos específicos como la mitigación ISI o ICI en transmisiones OFDM cuando se desconocen las características del canal (Farhang-Boroujeny, 2013). Los ecualizadores enunciados en este trabajo se basan en una estructura lineal y no lineal de retroalimentación de decisiones (DFE, *Decision-Feedback Equalizer*).

Los ecualizadores lineales son básicamente filtros adaptativos invariantes en el tiempo aplicados al inicio de la etapa de recepción de un sistema de comunicaciones para eliminar la ISI de tal forma que el proceso final de obtención de la información pueda ignorar dicho fenómeno. Los ecualizadores lineales pueden ser modelados de acuerdo con el diagrama de bloques mostrado en Fig. 30, donde  $x_n$  representa los datos de entrada,  $y_n$  los datos alterados y  $\hat{y}_n$  los datos recibidos.

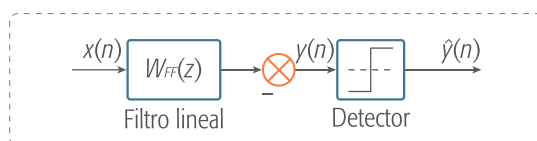


Fig. 30. Filtro adaptativo de estructura lineal.

Por otro lado, los ecualizadores de decisión retroalimentada son de tipo no lineal y su funcionamiento puede superar el desempeño de uno de tipo lineal manteniendo un nivel de complejidad similar. Estos están basados en el concepto de *cancelación de interferencia*, en el cual la interferencia es compensada y sustraída en la etapa de recepción. Los ecualizadores DFE se representan de acuerdo con el diagrama de bloques mostrado en Fig. 31.

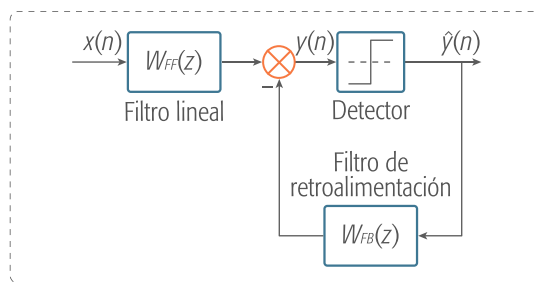


Fig. 31. Filtro adaptativo de estructura DFE.

Los parámetros de la estructura DFE obedecen a los de tipo lineal con la inserción del bloque de retroalimentación que tiene como finalidad usar datos previamente detectados para mejorar la estimación de la salida del canal. Los ecualizadores DFE, por lo tanto, son alimentados con datos detectados para producir una salida que es generalmente restada a la salida del ecualizador lineal.

A su vez, los ecualizadores mencionados se basan en algoritmos adaptativos para llevar a cabo determinados propósitos de compensación. Los algoritmos adaptativos enunciados en este trabajo corresponden a los de tipo Módulo Constante (CMA, *Constant Modulus Algorithm*), Cuadrado Mínimo Recursivo (RLS, *Recursive Least Square*), Cuadrado de la Media Mínima (LMS, *Least Mean Square*) y Mínimo Error Cuadrado Medio (MMSE, *Minimum Mean Square Error*).

CMA es uno de los algoritmos más investigados y utilizados dentro de los algoritmos de ecualización ciega, lo cual indica ecualización sin previo conocimiento de las características de la señal de entrada. CMA genera un arreglo de coeficientes de acuerdo con la ecuación (2).

$$w_n = w_a + stepSize \cdot \bar{u} \cdot e \quad (2)$$

donde  $w_n$  es el coeficiente nuevo,  $w_a$  es el coeficiente actual,  $\bar{u}$  es la conjugada compleja del vector de símbolos de entrada y el cálculo de error  $e = y (R - |y|^2)$ , en el cual  $y$  es la señal de salida y  $R$  es la constante de la señal de constelación. El *stepSize* debe ser especificado como un escalar positivo. Aumentar el *stepSize* reduce el tiempo de convergencia del ecualizador, pero hace menos estable la señal de salida ecualizada.

El algoritmo LMS cambia los coeficientes del filtro adaptativo para minimizar el error cuadrático medio de la señal de error. La forma en que genera el arreglo de coeficientes es equivalente a la forma en que lo hace el algoritmo CMA en (2), aunque la señal de error está determinada por su forma más directa  $e = d - y$ , en la cual  $d$  es la señal deseada a la salida del ecualizador.

RLS es un algoritmo adaptativo que recursivamente encuentra los coeficientes que minimizan la señal de error, la cual se expresa como  $e = d - y$ . Dicho algoritmo genera un arreglo de coeficientes como se muestra en la ecuación (3)

$$w_n = w_a + K \cdot e \quad (3)$$

donde  $K$  es la ganancia de Kalman en la ecuación (4),  $P$  es la matriz de correlación inversa,  $u$  es el vector de símbolos de entrada,  $u'$  es su equivalente transpuesto.

$$K = \frac{P \cdot u}{(forgettingFactor) + u' \cdot P \cdot u} \quad (4)$$

El factor de olvido (*forgettingFactor*) debe ser especificado como un escalar positivo en el rango (0 1]. Decrementar el *forgettingFactor* reduce el tiempo de convergencia del ecualizador, pero hace menos estable la señal de salida ecualizada.

Por último, el algoritmo MMSE cambia sus coeficientes con el fin de minimizar el error cuadrático medio (MSE) entre la salida del ecualizador y la señal esperada de la forma  $MSE = E(|e|^2)$ , donde  $E$  representa el valor discreto deseado y  $e = d - y$  es la señal de error.

### 6.3. Marco legal

El proyecto está sujeto a cumplir con algunos estándares y recomendaciones que serán mencionados a continuación:

- Especificaciones técnicas 38.104 del Proyecto Asociado de Tercera Generación (3GPP) sobre la transmisión y recepción de las Estaciones Base (EB).
- Especificaciones técnicas 38.211 del Proyecto Asociado de Tercera Generación (3GPP) sobre los canales físicos y la modulación.
- Recomendaciones G.652 del Sector de Estandarización de Telecomunicaciones (ITU) sobre las características de una fibra óptica monomodo estándar.
- Recomendaciones Series G del Sector de Estandarización de Telecomunicaciones (ITU) sobre los requerimientos de la red fronthaul 5G.
- Reporte M.2412-0 del Sector de Estandarización de Telecomunicaciones (ITU) sobre los lineamientos para la evaluación de interfaces de radio IMT-2020.

## 7. Resultados

En esta sección del documento se presentan los resultados obtenidos en la investigación de acuerdo con el planteamiento de los objetivos específicos en 5.2.

### 7.1. Recopilación de información

Se consultaron varias fuentes con el fin de entender el funcionamiento de los sistemas de RoF en un escenario de aplicación 5G. Entre estos se encuentra la literatura en (Konstantinou et al., 2019) donde se demuestra experimentalmente la transmisión de señales OFDM 5G a través de un enlace fronthaul de radio sobre fibra analógico. En (Lannoo et al., 2015) se diseña una red inalámbrica densa compuesta por células de radio implementadas en una red troncal sobre una arquitectura basada en Radio-sobre-Fibra (RoF). Mientras tanto, en (Zaidi et al., 2016) se explica de forma detallada en qué consiste la transmisión OFDM y por qué esta es una fuerte candidata a forma de onda para 5G.

Los estándares donde se encuentran las características físicas de las transmisiones de señales de radio OFDM en un escenario de RoF se consultaron en (“5G Wireless Fronthaul Requirements in a Passive Optical Network Context,” 2019; *Characteristics of a Single-Mode Optical Fibre and Cable, G.652*, 2016; “NR; Base Station (BS) Radio Transmission and Reception,” 2020; “NR; Physical Channels and Modulation,” 2020). En estas se especifican las numerologías asociadas a la forma de onda OFDM para un correcto diseño en escenarios 5G, así como las bandas de frecuencias en las que operará el estándar 5G NR. A su vez, se fijan las distancias de fibra permitidas para llevar a cabo transmisiones para redes de acceso futuras. Finalmente, en (ITU, 2017) se presentan los lineamientos de evaluación para tecnologías de interface de radio, de donde se destacaron los modelos de canal Rayleigh que permitieron modelar el canal inalámbrico en las simulaciones.

Finalmente, en (MathWorks, 2020) se consultó el Toolbox de Comunicaciones de MATLAB donde se accedió a las herramientas cualitativas y cuantitativas que posteriormente serían utilizadas en las simulaciones, tales como diagramas de ojo y constelación, medidas de BER y EVM, distribuciones de tipo Rayleigh para configuración del canal inalámbrico y el principio de funcionamiento de los ecualizadores adaptativos para compensar las degradaciones aportadas por el canal de comunicaciones en la simulación de las transmisiones.

## **7.2. Simulación del escenario de RoF con características de red 5G**

En esta fase del trabajo se simularon las etapas asociadas al escenario de transmisión por Radio-sobre-Fibra siguiendo los lineamientos del estándar 5G NR. Para ello, se realizaron tres tareas: simulación de la forma de onda RF-OFDM en 7.2.1, simulación del canal óptico en 7.2.2 y simulación del canal inalámbrico en 7.2.3.

### ***7.2.1. Simulación de la señal RF-OFDM.***

El respaldo teórico sobre la forma de onda RF-OFDM y sus parámetros asociados, puede ser consultado en 6.2.5. La simulación de la transmisión RF-OFDM se llevó a cabo de acuerdo con los pasos presentados a continuación.

#### **A. Revisión del estándar 5G NR.**

En las especificaciones técnicas 38.211 del 3GPP, se especifican para NR los esquemas de modulación  $\pi/2$ -BPSK, BPSK y QPSK para la Modulación por Desplazamiento de Fase (PSK, *Phase Shift Keying*) y 16QAM, 64QAM y 256QAM correspondientes a la Modulación de Amplitud en Cuadratura (QAM, *Quadrature Amplitude Modulation*) (“NR; Physical Channels and Modulation,” 2020).

Adicionalmente, en las especificaciones técnicas 38.211 y 38.104 se asume una gran variedad de numerologías para la generación de formas de onda OFDM y un rango de frecuencias operativas más amplio que en LTE para soportar un número mayor de servicios (“NR; Base Station (BS) Radio Transmission and Reception,” 2020; “NR; Physical Channels and Modulation,” 2020). Con base en lo anterior, en (Zaidi et al., 2016) se relacionan dichas numerologías con varios rangos de frecuencias a fin de llevar a cabo un diseño de forma de onda apropiado, como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3. Numerologías de transmisión OFDM soportadas para 5G NR.

Espaciado entre subportadoras $\Delta f$ [kHz]	Tamaño del bloque IFFT $N_f$	Duración del CP $t_{CP}$ [ $\mu$ s]	Tamaño del CP $N_{CP}$	Rango de frecuencias [GHz]
15	4096	4.69	288	$\leq 6$
30		2.35		$\leq 20$
60		1.17		$\leq 40$
120		0.57		$> 40$
240		0.29		$> 40$

De acuerdo con la tabla anterior,  $\Delta f$  indica el espaciado en frecuencia entre las subportadoras ortogonales,  $N_f$  representa el número total de subportadoras que tendrá la señal OFDM,  $t_{CP}$  es la duración del prefijo cíclico en microsegundos,  $N_{CP}$  es el número de muestras del prefijo cíclico incluidas en la señal OFDM, parámetros con los cuales se establece el rango de frecuencias adecuado ligado a la selección de los parámetros anteriores.

### B. Selección de los parámetros.

Inicialmente, la información en forma de bits enviada correspondió a una trama de bits generados de forma pseudoaleatoria. Posteriormente, de acuerdo con la revisión del estándar 5G NR, se escogió el esquema de modulación QPSK en lugar de los esquemas QAM de mayor orden, ya que se optó por limitar la velocidad de bits logable con el fin de garantizar un alcance mayor en las transmisiones. Se descartó también BPSK debido a que QPSK permite duplicar la tasa de

bits posibles mientras se ocupa el mismo ancho de banda ofrecido por BPSK. Los criterios para la selección de esquemas de modulación se abarcan de forma más detallada en (Chapman et al., 2015).

A su vez, se planteó analizar las limitaciones de las redes de acceso 5G futuras, las cuales están pensadas para ocupar las bandas de frecuencias más altas. A partir de lo anterior, se escogió una frecuencia de portadora RF de 50 GHz, la cual implica un tamaño de CP de 288 a 0.29  $\mu$ s de duración, un tamaño de bloque IFFT de 4096 y un espaciado entre subportadoras OFDM de 240 kHz. La Tabla 4 resume los parámetros escogidos para la simulación de la transmisión RF-OFDM.

Tabla 4. Parámetros de simulación de la transmisión RF-OFDM.

Tipo de datos	Esquema de modulación	Parámetros OFDM				Frecuencia de portadora RF
		Espaciado entre subportadoras	Tamaño del bloque IFFT	Duración del prefijo cíclico	Tamaño del prefijo cíclico	
Bits pseudo-aleatorios	QPSK	$\Delta f = 240$ kHz	$N_f = 4096$	$t_{CP} = 0.29$ $\mu$ s	$N_{CP} = 288$	50 GHz

### C. Herramientas de software empleadas.

Para la simulación de la transmisión RF-OFDM se usaron las siguientes funciones en MATLAB:

- *randi*: genera la información en forma de datos pseudoaleatorios.
- *transpose*: convierte los datos pseudoaleatorios de serie a paralelo y viceversa.
- *comm.QPSKModulator*: mapea los datos de acuerdo con el formato de modulación PSK de cuadratura.
- *comm.OFDMModulator*: modula los símbolos QPSK usando el método de multiplexación por división de frecuencia ortogonal OFDM.
- *Transmisor heterodino (programado)*: modula en radiofrecuencia la señal OFDM.



- *Receptor heterodino (programado)*: demodula en radiofrecuencia la señal RF-OFDM.
- *comm.OFDMDemodulator*: demodula la señal OFDM para obtener los símbolos QPSK.
- *comm.QPSKDemodulator*: demapea los símbolos QPSK para obtener la información originalmente enviada.

### 7.2.2. Simulación del canal óptico.

La simulación del canal óptico se llevó a cabo de acuerdo con la consecución de los siguientes pasos:

#### A. Revisión de las recomendaciones ITU-T.

En las recomendaciones ITU-T serie G sobre los requerimientos de la red fronthaul para 5G, se establece que los enlaces de fibra entre la CO hasta las BSs no deben sobrepasar los 20 km de distancia para servicios de baja latencia y se recomienda el uso de fibra monomodo estándar (SMF, *Single-mode Fiber*) debido a su baja atenuación (“5G Wireless Fronthaul Requirements in a Passive Optical Network Context,” 2019).

En las recomendaciones ITU-T G.652 sobre las características de los canales de fibra SMF, se establecen valores de longitud de onda de operación  $\lambda = 1550$  nm y del parámetro de dispersión  $D = 17$  ps/(nm·km), con los cuales fue posible realizar el cálculo de la dispersión cromática, enunciado en el inciso 7.2.2.C.

#### B. Selección del modelo de canal.

El canal óptico fue simulado mediante el modelo de propagación óptica de la ecuación (5), la cual gobierna el comportamiento de los pulsos ópticos dentro de una fibra SMF. En esta,  $A$

representa la amplitud de la envolvente de campo,  $z$  la longitud en kilómetros de la fibra y  $t$  el tiempo en picosegundos (Turitsyn et al., 2017).

$$j \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} - \frac{\beta_3}{6} \frac{\partial^3 A}{\partial t^3} = -\frac{\partial A}{\partial z} \quad (5)$$

Cabe destacar que el uso de dicho modelo permitió omitir el uso de los dispositivos ópticos (Láser, Modulador Mach Zehnder MZM y fotodetector) ilustrados en la Fig. 28, ya que se logró conservar el principio de la técnica de IM/DD a expensas de estos, permitiendo liberar la transmisión de las componentes de ruido agregadas por dichos dispositivos para así poder enfocar los resultados hacia el análisis de las degradaciones aportadas solo por el canal.

Además, se incluyó un canal de AWGN para determinar la cobertura alcanzable de la transmisión al enfrentarse a la variación de potencia de ruido óptica. Dicho canal se modeló de forma básica como una distribución gaussiana, cuya ecuación de distribución se expresa en (6)

$$P(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (6)$$

Donde  $\mu$  es la media, la cual tiene un valor de 0 para garantizar una densidad espectral de potencia plana,  $\sigma^2$  representa la varianza que toma valores diferentes dependiendo de la relación señal a ruido (SNR) y  $x$  es la señal de información RF-OFDM. Para la adición de ruido, se calculó la potencia  $P$  de la señal  $x$  por medio de  $P = \overline{|x|^2}$  para posteriormente calcular la varianza  $\sigma^2 = P/10^{SNR/10}$ . Para esto se calculó el valor de la SNR para la señal RF-OFDM, de acuerdo con la ecuación (7)

$$SNR = \frac{E_b}{N_0} + 10\log_{10}k + 10\log_{10} \frac{N_d}{N_f} \quad (7)$$

En esta se tuvo en cuenta el número de bits por símbolo  $k = 2$  para QPSK, el número de subportadoras totales  $N_f$  y útiles  $N_d = N_f - N_{CP}$ , así como el factor  $E_b/N_0$  (Relación entre la energía por bit y la densidad espectral de potencia de ruido). Una vez calculada la varianza, se generó una señal de ruido  $z$  usando la función *randn* de MATLAB, la cual retorna una matriz de números aleatorios normalmente distribuidos dependiendo de la longitud de la señal  $x$ . De esta forma se obtuvo la señal de salida alterada  $y = x + z$  en función de la variación de  $E_b/N_0$ .

### C. Selección de parámetros de canal.

Para el modelo empleado en las simulaciones, se escogieron tramos de fibra entre 1 km y 20 km para satisfacer el escenario de aplicación real para 5G mencionado en la sección 7.2.2.A. Además, se incluyeron tramos de fibra mayores de hasta 700 km con el fin de discutir el desempeño de las herramientas de compensación en escenarios de aplicación donde las afectaciones aportadas por el canal óptico fueran más significativas, lo cual es soportado más adelante en 7.3.2.A.

Asimismo, solo se tuvo en cuenta la CD a causa de los parámetros de dispersión de segundo  $\beta_2$  y tercer orden  $\beta_3$ , los cuales fueron calculados a partir de los valores de longitud de onda de operación  $\lambda$  y parámetro de dispersión  $D$  enunciados en la sección 7.2.2.A de acuerdo con las recomendaciones ITU-T (“Characteristics of a Single-Mode Optical Fibre and Cables,” 2016). Dicho cálculo se llevó a cabo por medio de  $\beta_2 = -D\lambda^2/2\pi c_0$  y  $\beta_3 = 2\pi c_0^{-2}/\lambda^2$  expresadas en (Agrawal, 2013), donde  $c_0$  es el valor de la velocidad de la luz en el vacío. El resumen de los parámetros escogidos para el canal óptico se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5. Parámetros de simulación del canal óptico

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidades
Tramos de fibra	$z$	(0, 700]	km
Longitud de onda de operación	$\lambda$	1550	nm
Parámetro de dispersión	$D$	17	ps/(nm·km)
Dispersión segundo orden	$\beta_2$	-21.682	ps·ps/km
Dispersión tercer orden	$\beta_3$	0.117	ps·ps·ps/km

Por último, el canal AWGN permitió variar la potencia de ruido del canal óptico para alterar la información y poder evaluar hasta qué punto sería posible lograr una buena transmisión para diferentes escenarios. Para esto, el parámetro  $E_b/N_0$  tomó valores entre 0 y 35 dB para las simulaciones que implicaban la variación de la SNR óptica.

#### **D. Herramientas de software empleadas.**

Para la simulación del canal óptico se programó la respuesta en frecuencia del modelo de la solución analítica de la GNLSE mostrado en (5), de acuerdo con el lenguaje de programación nativo de MATLAB.

#### **7.2.3. Simulación del canal inalámbrico.**

La simulación del canal inalámbrico se llevó a cabo siguiendo el procedimiento expresado a continuación:

##### **A. Selección del modelo de canal.**

El canal inalámbrico se modeló como un canal de dispersión Rayleigh para la evaluación de la robustez de la transmisión contra los efectos de la multipropagación, en adición a un canal de AWGN para determinar la cobertura alcanzable de la transmisión al enfrentarse a la variación de potencia de ruido inalámbrica, cuya distribución es la misma empleada en 7.2.2.B.

El canal de Rayleigh se modeló como un filtro lineal de respuesta a impulsos finitos (FIR), el cual se compone de un número variable de taps de retardos, así como de varios taps de ganancias como se expresa en (8), donde se entiende por *tap* como un retardo específico en la línea total de retardos (Jeruchin et al., 2000; MathWorks, 2020).

$$y_i = \sum_{n=-N_1}^{N_2} s_i - n \cdot g_n \quad (8)$$

En (8),  $s_i$  denota el conjunto de muestras a la entrada del canal y  $y_i$  las muestras a la salida.  $g_n$  es el conjunto de ganancias de tap, mientras que  $N_1$  y  $N_2$  se seleccionan para hacer  $|g_n|$  pequeño cuando  $n$  es menor que  $N_1$  o mayor que  $N_2$  (MathWorks, 2020).

### B. Revisión del estándar IMT-2020.

De acuerdo con el reporte ITU-R M.2412-0 acerca de los lineamientos para la evaluación de tecnologías de radio interface, se presentan modelos basados en líneas de retardo (TDL, *Tapped Delay Line*) para la evaluación simplificada de sistemas de comunicaciones definidos para rangos de frecuencia entre 0.5 y 100 GHz. Entre estos, el grupo TDL-ii permite evaluar el sistema en un escenario de distribución tipo Rayleigh con base en las líneas de retardo mostradas en la Tabla 6.

Tabla 6. Modelos de canal TDL-ii

Distribución Rayleigh	Tap #	Retardos normalizados	Potencia en [dB]
	1	0.0000	0
	2	0.1072	2.2
	3	0.2155	-4
	4	0.2095	-3.2
	5	0.2870	-9.8
	6	0.2986	-1.2
	7	0.3752	-3.4
	8	0.5055	-5.2
	9	0.3681	-7.6
	10	0.3697	-3
	11	0.5700	-8.9
	12	0.5283	-9
	13	1.1021	-4.8
	14	1.2756	-5.7
	15	1.5474	-7.5
	16	1.7842	-1.9
	17	2.0169	-7.6
	18	2.8294	-12.2
	19	3.0219	-9.8
	20	3.6187	-11.4
	21	4.1067	-14.9
	22	4.2790	-9.2
	23	4.7834	-11.3

### **C. Selección de parámetros del canal.**

En este trabajo, el canal Rayleigh fue modelado como un sistema de 4 taps de retardo de acuerdo con la Tabla 6 con un máximo retardo de 0.2095, cuya distribución presenta una respuesta no selectiva también llamada respuesta plana.

Por medio del canal AWGN, se varió la potencia de ruido del canal para alterar la información y poder evaluar hasta qué punto sería posible lograr una buena transmisión para diferentes escenarios. Para esto, el parámetro  $E_b/N_0$  tomó valores entre 0 y 35 dB para las simulaciones que implicaban la variación de la SNR inalámbrica.

### **D. Herramientas de software empleadas.**

Para la simulación de los canales inalámbricos se usaron las siguientes funciones en MATLAB:

- *comm.RayleighChannel*: filtra una señal de entrada a través de un canal fading Rayleigh.
- *comm.AWGNChannel*: agrega ruido blanco gaussiano a la señal de entrada.

## **7.3. Análisis de los efectos de propagación**

Los resultados del análisis fueron enfocados a mostrar cómo la transmisión de una señal OFDM es afectada por el canal óptico e inalámbrico en un escenario RoF. Inicialmente se definieron las herramientas a emplear para el análisis en 7.3.1 y posteriormente se realizó el análisis de las degradaciones en 7.3.2 apoyado con dichas herramientas.

### 7.3.1. Herramientas empleadas.

En esta sección se realizó la selección de las herramientas de evaluación cuantitativa y cualitativa y las respectivas funciones de MATLAB para su implementación en las simulaciones.

#### A. Herramientas de evaluación cuantitativa.

Las herramientas de evaluación cuantitativa seleccionadas para la sección del análisis se basaron en las medidas de EVM y BER.

El EVM mide la cantidad de distorsión en amplitud y fase de una señal enviada en un sistema de comunicaciones. Este fue medido de acuerdo con la ecuación (9), donde  $I_k$  y  $Q_k$  son la medición en fase y cuadratura del bit de entrada  $k_n$ , respectivamente, y  $N$  es la longitud del vector de la trama de bits de entrada. Para NR, el porcentaje máximo aceptado para garantizar transmisiones de buena calidad con QPSK está fijado en 17.5% en (“NR; Base Station (BS) Radio Transmission and Reception,” 2020).

$$EVM_{RMS} = \sqrt{\frac{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \left[ (I_k - \tilde{I}_k)^2 + (Q_k - \tilde{Q}_k)^2 \right]}{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (I_k^2 + Q_k^2)}} \cdot 100 \quad (9)$$

Las medidas de BER representan el error entre los bits de entrada y salida enviados originalmente en el sistema de comunicaciones. En este trabajo, el BER fue estimado de acuerdo con el método de calibración a partir del EVM presentado en (Irshaad, 2017) y mostrado en la ecuación (10)

$$BER = \frac{(1 - M^{-1/2})}{\frac{1}{2} \log_2 M} \operatorname{erfc} \left[ \sqrt{\frac{3/2}{(M-1) \cdot EVM_{RMS}^2}} \right] \quad (10)$$

En la ecuación,  $M = 4$  es el orden del esquema de modulación empleado (QPSK),  $erfc$  es la función de error complementario expresada en (MathWorks, 2020) y  $EVM_{RMS}$  es el valor de EVM obtenido de (9). De acuerdo con (Walsh et al., 2005), el mínimo BER permitido para garantizar una transmisión correcta en telecomunicaciones ronda el orden de  $10^{-9}$ .

### **B. Herramientas de evaluación cualitativa.**

Las herramientas de evaluación cualitativa seleccionadas para el análisis de las degradaciones fueron diagramas de constelación y diagramas de ojo.

Los diagramas de constelación muestran la representación compleja de una señal en el plano I/Q y las afectaciones en amplitud y fase que esta sufre. Por medio de dichos diagramas es posible llevar a cabo un análisis cualitativo de las señales moduladas de acuerdo con un esquema de modulación predeterminado, el cual corresponde a QPSK en este trabajo. De esta forma, se puede determinar la afectación del canal o la influencia del esquema de modulación seleccionado en la calidad de las transmisiones.

Adicionalmente, los diagramas de ojo muestran múltiples trazos de una señal modulada con el fin de analizar cualitativamente las características de la señal o medir la distorsión del canal. Los diagramas de ojo pueden ser además representaciones en el tiempo de las partes real e imaginaria de la señal modulada y sus ejes  $x$  y  $y$  corresponden a tiempo y amplitud real/imaginaria, respectivamente. Un ejemplo de estos se muestra en la Fig. 32.



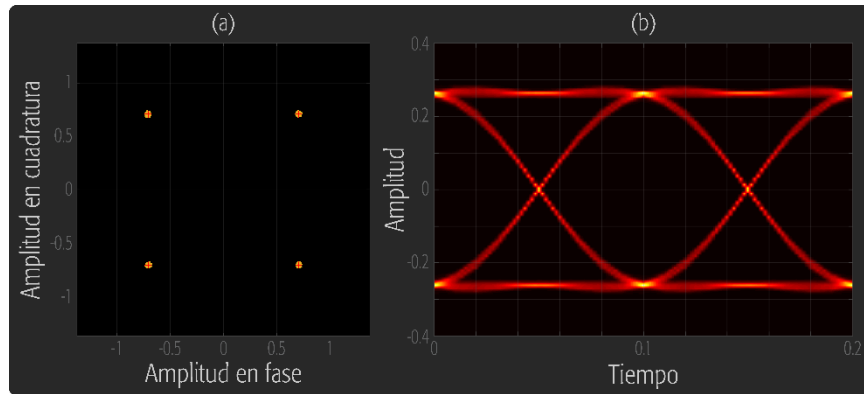


Fig. 32. Herramientas de análisis cualitativo. (a) Diagrama de constelación, (b) Diagrama de ojo.

### C. Herramientas de software.

Para la ejecución de las herramientas de evaluación cualitativas y cuantitativas se usaron las siguientes funciones en MATLAB:

- *comm.EVM*: mide las degradaciones en una señal modulada.
- *Bit Error Rate (programado)*: mide la tasa de error de acuerdo con la comparación entre los bits de entrada desde un transmisor y los bits de salida desde un receptor. Esta herramienta fue programada con base en los lineamientos presentados en la literatura (Irshaad, 2017).
- *comm.ConstellationDiagram*: muestra el valor real y complejo de una señal modulada en el plano complejo IQ.
- *comm.EyeDiagram*: muestra múltiples trazos de una señal modulada para producir un diagrama del ojo.

#### 7.3.2. Análisis de las degradaciones.

En esa sección del documento se analizan las degradaciones ocasionadas primeramente por el canal óptico en 7.3.2.A y posteriormente debidas al canal inalámbrico en 7.3.2.B.

### A. Degradaciones debidas al canal óptico.

Para analizar las degradaciones debidas al canal óptico y determinar la robustez de la forma de onda OFDM frente al ruido externo, se realizaron simulaciones de la transmisión OFDM a lo largo de diferentes tramos de fibra teniendo en cuenta la potencia de ruido óptico aportada por el canal AWGN. Para esto, en la Fig. 33 se muestran curvas BER con respecto a la variación del parámetro  $E_b/N_0$  entre 1 y 30 dB para evaluar el valor máximo de relación señal a ruido (SNR) que garantiza una transmisión óptima para tramos de fibra de 1, 20, 60 y 100 km. Los resultados permiten posteriormente llevar a cabo un análisis de tipo cuantitativo del escenario simulado.

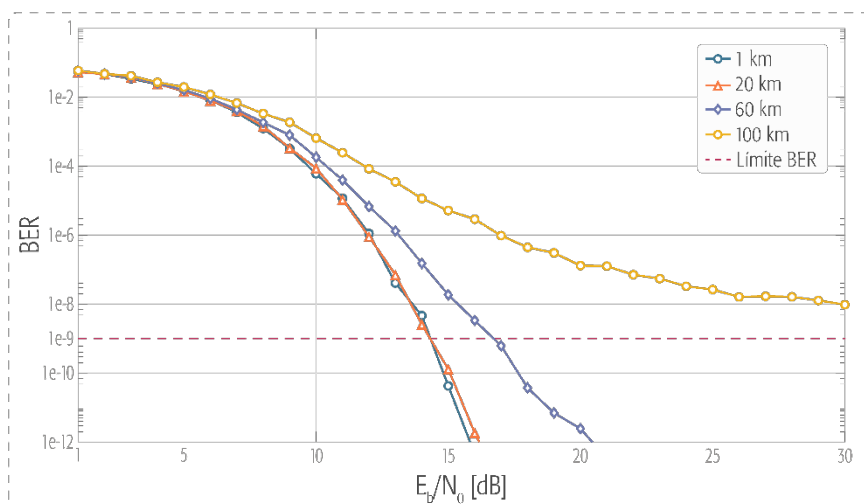


Fig. 33. Curvas de BER vs  $E_b/N_0$ . Análisis óptico para 1, 20, 60 y 100 km de fibra.

Así como se mencionó en la sección 7.3.1.A, el mínimo BER permitido para garantizar una transmisión correcta en telecomunicaciones ronda el orden de  $10^{-9}$ . Se puede observar que las transmisiones para todas las distancias mantuvieron un desempeño de BER similar hasta  $\sim 7$  dB, valor a partir del cual los resultados cambiaron su tendencia en función de cada distancia de fibra. Las transmisiones a 1 y 20 km exhibieron un desempeño similar alcanzando el mínimo BER permitido a  $\sim 14$  dB, lo cual indica que las degradaciones aportadas por el canal en un rango de 20 km no son significativas. Para lograr el mismo propósito a lo largo de 60 km, se requirió de +3 dB que en los escenarios anteriores. Por el contrario, la transmisión a través del enlace de 100 km

mostró una respuesta descendiente hasta un valor de  $\sim 15$  dB, a partir del cual presentó una tendencia a estabilizarse a un BER de  $\sim 10^{-8}$  sin antes llegar al límite aceptado.

Con base en los resultados de la Fig. 33, se optó por analizar el escenario de aplicación real de servicios de baja latencia para NR que se menciona en el inciso 7.2.2.A. Para esto, en la Fig. 34 se presentan diagramas de constelación que soportan los resultados obtenidos de la figura anterior para una distancia de fibra fija de 20 km ante la variación de la relación señal a ruido normalizada ( $E_b/N_0$ ).

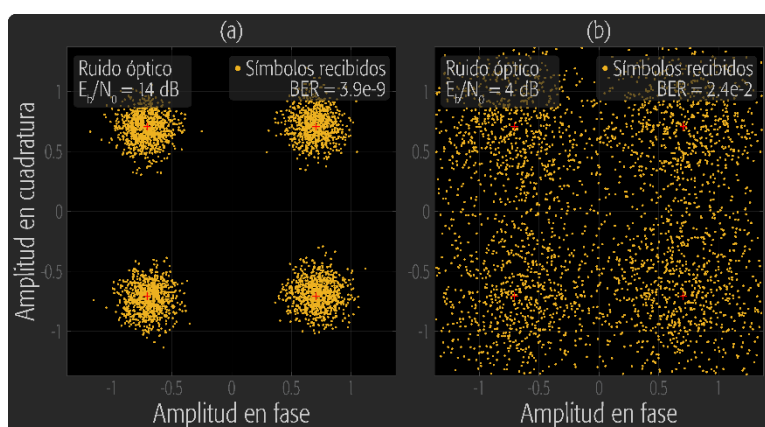


Fig. 34. Diagramas de constelación. Análisis óptico para 20 km de fibra. (a) Desempeño a  $E_b/N_0 = 14$  dB, (b) Desempeño a  $E_b/N_0 = 4$  dB.

Los diagramas muestran que el desempeño de la transmisión mejoró frente al aumento del valor de  $E_b/N_0$ , lo cual fue soportado de forma cuantitativa por las medidas de BER. Por ejemplo, para  $E_b/N_0 = 4$  dB los símbolos sufrieron degradaciones muy abruptas arrojando un valor de BER muy alto e imposibilitando la transmisión a menos de incluir alternativas de ecualización en la etapa de recepción que recuperaran la información enviada. Se muestra también que, a pesar de que existe clara dispersión de los símbolos, la transmisión para valores de  $E_b/N_0$  mayores que  $\sim 14$  dB arrojó un buen desempeño de BER logrando valores cercanos a  $10^{-9}$ .

A su vez, mediante los diagramas de ojo de la Fig. 35 se soportan cualitativamente los resultados obtenidos anteriormente.

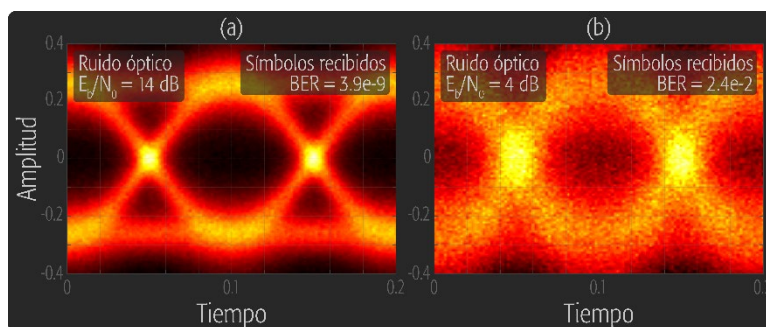


Fig. 35. Diagramas de ojo. Análisis óptico para 20 km de fibra. (a) Desempeño a  $E_b/N_0 = 14$  dB, (b) Desempeño a  $E_b/N_0 = 4$  dB.

Así como en los diagramas de constelación, cuando  $E_b/N_0$  tomó valores de 4 dB, la calidad del ojo presentó niveles de distorsión muy altos que reflejaron obtención de información errónea tras la transmisión. En el recuadro (a), sin embargo, se muestra que fue posible transmitir la señal OFDM para 20 km de fibra obteniendo valores de BER cerca de los límites recomendados a pesar de que existe clara distorsión en el cruce por cero y la abertura del ojo no está totalmente amplia.

Por otro lado, para evidenciar cualitativamente el efecto de la fibra en la señal de información e identificar los efectos involucrados en la disminución de la calidad de las transmisiones, la simulación del sistema se llevó a cabo considerando distancias de fibra mayores a 20 km y despreciando en esta ocasión la potencia de ruido aportada por el canal AWGN. Para esto, en la figura Fig. 36 se presentan diagramas de constelación de la transmisión de la señal OFDM a lo largo de distancias de fibra de 1 y 100 km para una potencia de ruido óptico despreciable. Las gráficas obtenidas fueron soportadas con mediciones de EVM para cada escenario.

A partir de los diagramas se puede apreciar una respuesta en frecuencia irregular en forma de ruido gaussiano común a todos los diagramas de constelación. Este ruido es debido a irregularidades durante el proceso de recepción RF, el cual es evidenciado y explicado en la literatura (Shih et al., 2009). Adicionalmente, se evidencia Desplazamiento de Frecuencia de Portadora (CFO, *Carrier Frequency Offset*) que se aprecia como rotación de los símbolos

transmitidos en el plano, dando lugar a una forma característica de banana. El CFO se hizo más evidente usando una distancia de fibra de 100 km, así como se muestra en la Fig. 36(b). Dicho efecto conlleva a que se pierdan componentes espectrales en el borde del espectro en frecuencia de la señal de información y se debe a un desfase de frecuencia entre la señal óptica recibida y el oscilador local (LO), lo cual provoca Interferencia Interportadora (ICI, *Inter-carrier Interference*) en las transmisiones OFDM, ocasionando un bajo rendimiento de BER y EVM (Moon et al., 2017).

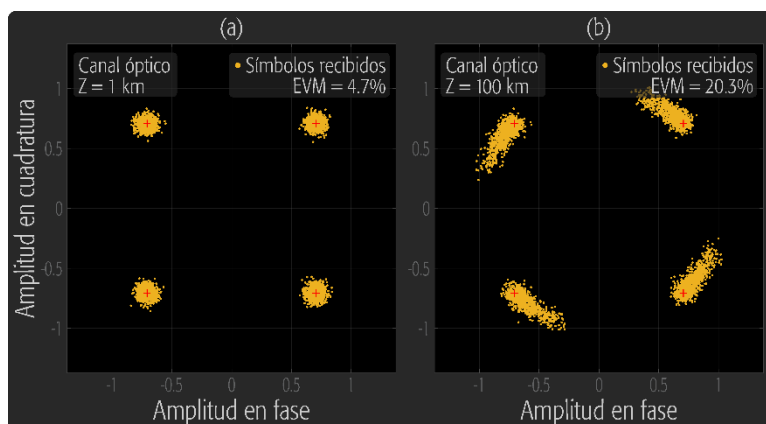


Fig. 36. Diagramas de constelación. Análisis óptico con potencia de ruido óptico despreciable. (a) Desempeño a 1 km de fibra, (b) Desempeño a 100 km de fibra.

A partir de estos resultados, se puede evidenciar que el efecto de distorsión predominante en las transmisiones simuladas para distancias de fibra superiores fue el CFO, mientras que no hubo presencia de dispersión de símbolos alrededor de los puntos de constelación al aumentar la distancia de la fibra, cuyo efecto es característico de la Dispersión Cromática (CD). El comportamiento anterior es atribuido en diversas literaturas, entre ellas en (Asplund et al., 2020), a la alta inmunidad de la técnica OFDM frente a la Dispersión Cromática como consecuencia de la ortogonalidad entre portadoras.

Para el análisis cuantitativo de la misma figura, se muestran valores de EVM, los cuales reflejan alteraciones de amplitud y fase en los símbolos enviados. El límite máximo aceptado para garantizar transmisiones de buena calidad con QPSK para NR está fijado en un EVM de 17.5% en

(“NR; Base Station (BS) Radio Transmission and Reception,” 2020). Así, la transmisión a través de 100 km de fibra resultó en un bajo desempeño de EVM, mientras que para 1 km se evidenció una afectación leve por parte del canal manteniendo valores de EVM debajo del límite aceptado, garantizándose una transmisión óptima.

En la Fig. 37 se presentan los mismos resultados de la figura anterior, aunque esta vez por medio de diagramas de ojo, los cuales permiten visualizar la degradación de la información debida a la fibra en el dominio del tiempo.

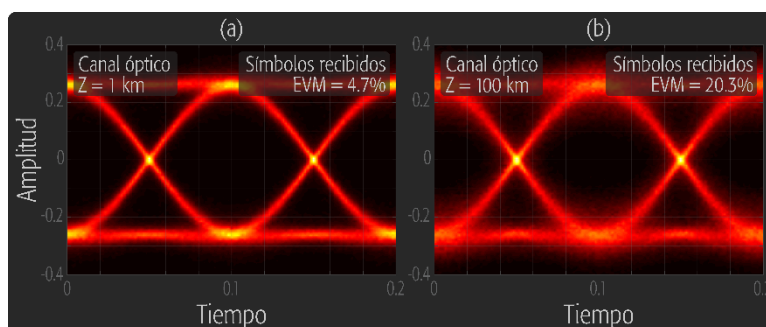


Fig. 37. Diagramas de ojo. Análisis óptico con potencia de ruido óptico despreciable. (a) Desempeño a 1 km de fibra, (b) Desempeño a 100 km de fibra.

Así como en los diagramas de constelación, la deformación para las distancias de 1 km no fue significativa debido a que la cantidad de distorsión vista es baja preservando una forma de ojo correcta. Este efecto aumentó levemente a los 100 km observándose una ligera disminución en la altura del ojo debido a la distorsión aportada por el canal. A pesar de que el recuadro (b) no presenta una distorsión excesiva, el desempeño del EVM estuvo fuera de los límites aceptados, indicando que el CFO tiene una incidencia negativa importante en la información enviada, aunque poco apreciable cuando se analiza mediante diagramas de ojo.

### **B. Degradaciones debidas al canal inalámbrico.**

En esta sección se analizan las degradaciones aportadas por el canal inalámbrico, el cual fue modelado como un canal de desvanecimiento Rayleigh de 4 taps de respuesta plana. Por lo

tanto, los efectos aportados por el canal de fibra fueron suspendidos de momento para así realizar el análisis cualitativo y cuantitativo de dicho canal correctamente.

Para evaluar el desempeño de la transmisión de la señal OFDM y su respuesta al ruido externo a través del modelo de canal mencionado, en la Fig. 38 se muestran curvas de EVM en función de la variación en la potencia de ruido del canal AWGN para valores de  $E_b/N_0$  entre 1 y 35 dB.

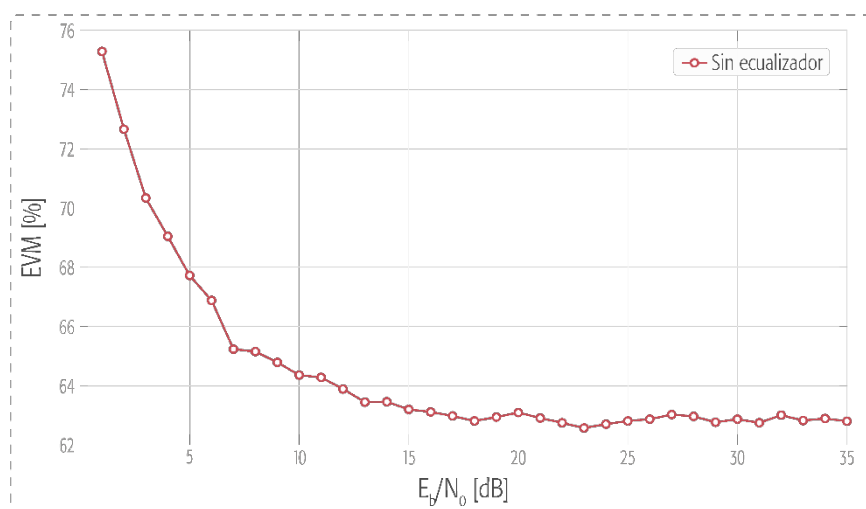


Fig. 38. Curvas de EVM vs  $E_b/N_0$ . Análisis inalámbrico.

Según las curvas presentadas, los valores de EVM decrecieron de forma pronunciada hasta  $\sim 13$  dB, a partir de donde el desempeño del EVM conservó una tendencia levemente fluctuante alrededor de 61%. Con base los datos presentados, se determina que el escenario de transmisión de la señal OFDM no ofreció buenos resultados en un ambiente de dispersión por multitrayectoria de tipo Rayleigh de respuesta plana, indicando la necesidad de incorporar un bloque de ecualización en la etapa de recepción del sistema.

El desempeño de EVM presentado en las curvas de la Fig. 38 se ve soportado cualitativamente por los diagramas de la Fig. 39, donde se evidencia el desempeño de la señal de

información al enviarse por el canal de dispersión Rayleigh de 4 taps, aunque esta vez sin ruido aportado por el canal AWGN.

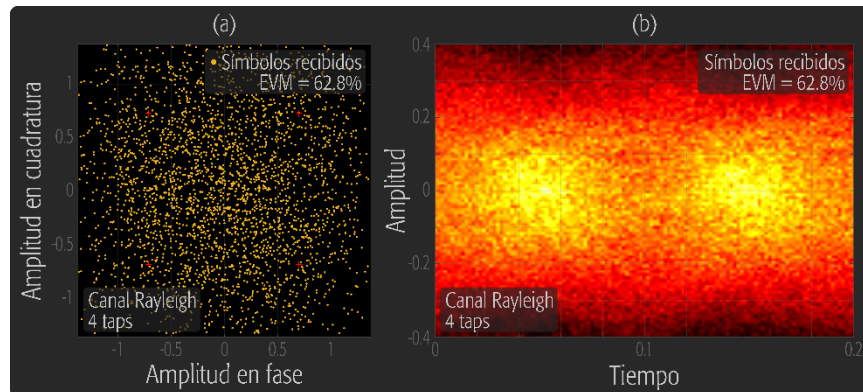


Fig. 39. Análisis inalámbrico con potencia de ruido óptico despreciable. (a) Desempeño por medio de diagrama de constelación, (b) Desempeño por medio de diagrama de ojo.

De acuerdo con la Fig. 39(a), los puntos de constelación no son identificables mostrando niveles altos de interferencia Intersimbólica por parte de la dispersión del canal. De forma similar, el diagrama de ojo presenta gran cantidad de distorsión, lo cual indica la imposibilidad de realizar transmisiones a través del canal Rayleigh empleado sin previa ecualización.

## 7.4. Implementación de los algoritmos de compensación

En este capítulo se abarca enuncian las herramientas empleadas para la implementación de los algoritmos de compensación en 7.4.1, mientras que los parámetros más importantes para la construcción de estos son especificados en 7.4.2.

### 7.4.1. Herramientas empleadas.

Los ecualizadores y algoritmos escogidos en este trabajo para llevar a cabo la compensación de las degradaciones aportadas por el canal híbrido abordado son enunciados y definidos en 7.4.1.A. Más adelante, en 7.4.1.B se especifican las herramientas de software que permitieron su simulación.



### A. Ecualesadores adaptativos.

Los ecualizadores empleados en este trabajo para la mitigación de la ICI en las simulaciones de las transmisiones OFDM fueron de tipo lineal y basados en una estructura de retroalimentación de decisiones (DFE, *Decision-Feedback Equalizer*).

A su vez, los algoritmos adaptativos empleados en este trabajo corresponden a los de tipo Módulo Constante (CMA, *Constant Modulus Algorithm*), Cuadrado Mínimo Recursivo (RLS, *Recursive Least Square*), Cuadrado de la Media Mínima (LMS, *Least Mean Square*) y Mínimo Error Cuadrado Medio (MMSE, *Minimum Mean Square Error*), cuyos coeficientes y parámetros correspondientes están listados en Tabla 7. Información más detallada sobre el funcionamiento de los ecualizadores y algoritmos adaptativos puede ser consultada en el capítulo 6.2.6 de este documento.

Tabla 7. Configuración de los ecualizadores adaptativos usados.

Tipo de ecualizador	Número de coeficientes	Coefficientes de retroalimentación	Coefficientes futuros	Coefficientes de referencia	Step Size	Forgetting Factor
DFE-LMS	-	8	10	-	0.01	-
DFE-RLS	-	8	5	-	0.01	-
LMS lineal	15	-	-	8	0.01	-
CMA lineal	5	-	-	5	0.01	-
RLS lineal	31	-	-	15	-	0.999
MMSE lineal	20	-	-	5	0.01	-

### B. Herramientas de software.

Para la ejecución de los ecualizadores lineal y de decisión retroalimentada se usaron las siguientes funciones en MATLAB:

- *comm.LinearEqualizer*: Ecualiza señales moduladas usando filtrado lineal de acuerdo con los algoritmos adaptativos CMA, LMS y RLS.
- *comm.DecisionFeedbackEqualizer*: Ecualiza señales moduladas usando filtrado de decisión retroalimentada de acuerdo con los algoritmos adaptativos CMA, LMS y RLS.

- *Ecualizador lineal MMSE (programado)*: Ecualiza señales moduladas usando filtrado lineal de acuerdo con el algoritmo adaptativo MMSE.

#### 7.4.2. Implementación de los algoritmos de compensación.

La implementación de los algoritmos en MATLAB parte del desarrollo del pseudocódigo de cada algoritmo de acuerdo con los siguientes pasos:

Inicio

1. Recibir el vector  $Y$  correspondiente a la representación QPSK de la señal de salida.
2. Crear la variable  $l$  y asignarle un entero positivo que corresponda a la longitud del vector  $y$ .
3. Crear una variable  $n$  y asignarle un entero positivo que corresponda al número de coeficientes del filtro.
4. Crear una matriz de ceros  $X$  de  $n$  filas y  $l$  columnas.
5. Asigne a cada columna de la matriz  $X$  un vector muestra\* del vector complejo  $Y$ .  
\*Vector muestra: es un vector que contiene las  $n$  primeras muestras del vector  $Y$ . Para los siguientes vectores, es el mismo vector previo desplazado una muestra.
6. Crear un vector fila de ceros  $E$  de longitud  $l$  en el que se almacenará el error instantáneo en cada iteración.
7. Crear un vector columna de ceros  $W$  de longitud  $n$  en el que se guardarán y actualizarán los coeficientes del filtro.
8. Crear una variable  $stepSize$  o  $forgettingFactor$  y asignarle un valor de acuerdo con las características del algoritmo de compensación.
9. Crear una variable  $i$  que inicie en valor 1.
10. Crear una variable  $z$  y asignarle el producto de la transpuesta del vector de coeficientes  $W$  con el vector columna  $X_i$  correspondiente a la columna  $i$  de la matriz  $X$ .
11. Calcular el valor de la posición  $i$  del vector de error  $E$ , cuyo valor es igual a la magnitud de la variable  $z$  elevada al cuadrado restándole una unidad y elevado al cuadrado.
12. Actualizar el vector de coeficientes del filtro  $W$  de la siguiente manera: el nuevo valor del vector de coeficientes será igual al valor actual de  $W$  menos el producto entre el parámetro  $stepSize$  o  $forgettingFactor$ , la posición  $i$  del vector de error  $E$ , el vector columna  $X_i$  y la variable  $z$ .
13. Aumentar  $i$  en una unidad
14. Si  $i$  es menor o igual que la longitud  $l$ , volver al paso (16), sino seguir al paso (21)
15. Crear el vector complejo  $S$  que corresponde a la señal luego de la ecualización, dado por el producto entre el valor final del vector de coeficientes  $W$  y la matriz  $X$ .

Fin.

Siguiendo los pasos del pseudocódigo anterior, se pudo llevar a cabo la implementación de los ecualizadores adaptativos mencionados en 7.4.1.A así como se muestra en el diagrama de flujo de la .

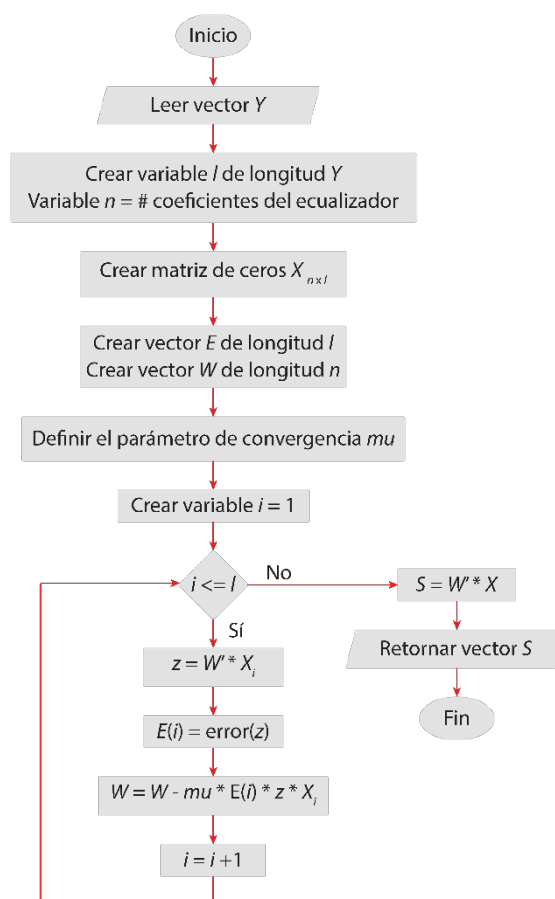


Fig. 40. Diagrama de flujo de la implementación de los algoritmos de compensación.

## 7.5. Evaluación del desempeño de los algoritmos de compensación

En la evaluación del desempeño de los algoritmos se presentaron los resultados más relevantes de la compensación de los impedimentos aportados únicamente por el canal óptico en 7.5.1, mientras que en 7.5.2 se compensan las degradaciones adicionales por el canal inalámbrico modelado como un canal de desvanecimiento Rayleigh. Por último, en 7.5.3 el enfoque principal es la compensación de los efectos aportados por ambos canales, óptico e inalámbrico, en conjunto.

### 7.5.1. Compensación del canal óptico.

La evaluación del rendimiento de los métodos de ecualización fue llevada a cabo en esta sección de acuerdo con la variación del valor de  $E_b/N_0$  en 7.5.1.A y según la distancia del tramo de fibra óptica en 7.5.1.B.

#### A. Compensación en función del valor de $E_b/N_0$ .

En los resultados del análisis presentado en la sección 7.3.2.A, se evidenció que la transmisión OFDM arrojó resultados positivos para distancias de fibra óptica entre 1 y 20 km, las cuales corresponden al rango estandarizado en las recomendaciones ITU-T serie G para transmisiones en aplicaciones 5G. Por lo tanto, en esta sección se optó por compensar los efectos de dispersión en un escenario de transmisión donde las degradaciones aportadas por la fibra comprometieran significativamente el desempeño del sistema para posteriormente evidenciar y evaluar de una forma más clara el desempeño de los algoritmos de compensación ejecutados.

Para satisfacer este propósito, en la Fig. 41 se presentan resultados de la transmisión OFDM en forma de curvas de BER vs  $E_b/N_0$  para 100 km de fibra antes y después de la implementación de los algoritmos de compensación adaptativos seleccionados en 7.4.1.

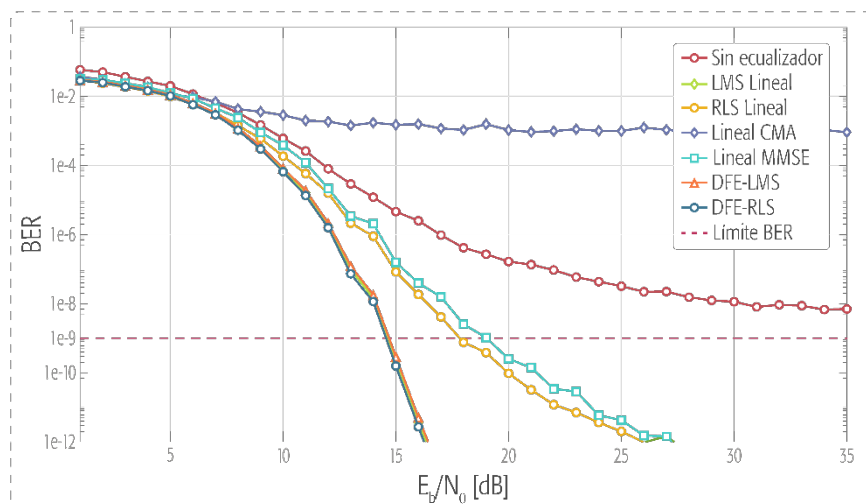


Fig. 41. Curvas de BER vs  $E_b/N_0$ . Compensación óptica para 100 km de fibra.

Los resultados obtenidos sin aplicar ecualización presentaron una tendencia a estabilizarse alrededor de un BER de  $10^{-8}$ , por lo tanto, fuera del límite recomendado para aplicaciones de telecomunicaciones. Sin embargo, se vio un notable mejoramiento en el desempeño de la transmisión después de la ecualización, particularmente luego de emplear ecualizadores DFE LMS y RLS, al igual que el ecualizador lineal RLS, con los cuales fue posible consolidar las transmisiones en un rango entre 14 y 15 dB asegurando valores de BER aceptables.

Con los ecualizadores RLS y MMSE lineales se optimizó de forma similar la transmisión, aunque con un recargo de alrededor de +3 dB y +4 dB, respectivamente, con respecto a los primeros. En contraste, la aplicación del ecualizador lineal CMA no presentó ninguna mejora, incluso llevó al sistema a presentar un desempeño menos favorable que al no usar métodos de compensación. Este resultado irregular se debe a que las señales OFDM no cumplen con conservar una forma de onda constante, lo cual figura como el requisito central del algoritmo CMA, precisamente como su nombre lo indica Algoritmo de Módulo Constante (envolvente constante). OFDM es conocido por su gran rango dinámico también llamado PAPR (Peak to Average Power Ratio, *Relación de Potencia entre Pico y Promedio*), lo cual anula dicha característica de envolvente constante.

Como se explicó en el capítulo de análisis óptico en 7.3.2.A, los recargos en la transmisión a través del canal óptico se presentaron principalmente como CFO aportado a los símbolos enviados; Los diagramas de constelación de la Fig. 42 muestran el mejor y peor escenario obtenido luego de la compensación de dicho efecto con base en medidas de EVM.

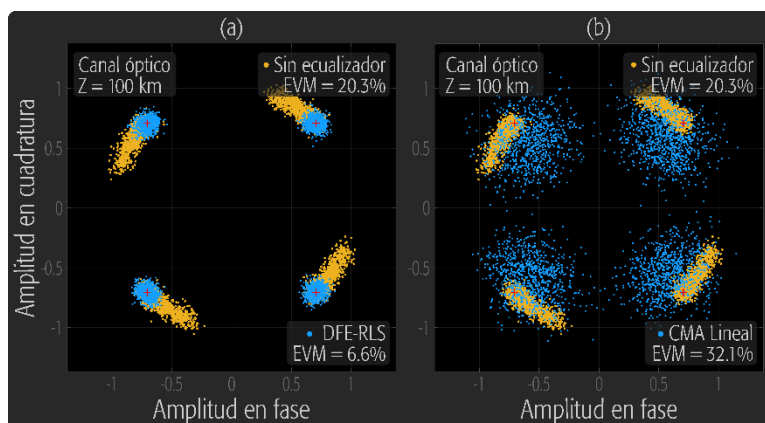


Fig. 42. Diagramas de constelación. Compensación óptica para 100 km de fibra con potencia de ruido óptico despreciable. (a) Desempeño del ecualizador DFE RLS, (b) Desempeño del ecualizador CMA lineal.

La figura anterior muestra que después de la aplicación del ecualizador DFE RLS, el efecto de CFO causante de ICI fue mitigado por completo para 100 km de fibra, permitiendo que los símbolos enviados se mantuvieran al margen de los puntos de constelación del diagrama. Lo anterior indicó un resultado positivo en la transmisión y un mejoramiento en el desempeño EVM del 13.7%. En contraste, el CPE presenciado como ruido común en los puntos de constelación no fue corregido después de aplicar ecualización, indicando que los métodos de compensación empleados no son los adecuados para suprimir dicho efecto.

Por otro lado, en el recuadro (b) se evidencia que los resultados después de la ecualización de tipo CMA lineal no arrojaron un buen desempeño final, de hecho, las degradaciones fueron intensificadas; si bien se corrigió el CFO sufrido en la información sin ecualizar, se evidenció un aumento en el CPE y una ligera atenuación en la ganancia de los símbolos. Las medidas de EVM justifican lo anterior mostrando un aumento del 11.8% después de aplicar dicho ecualizador.

El mismo escenario fue analizado en la Fig. 43 con base en diagramas de ojo, los cuales arrojaron resultados coherentes respecto de los obtenidos en los diagramas de constelación.

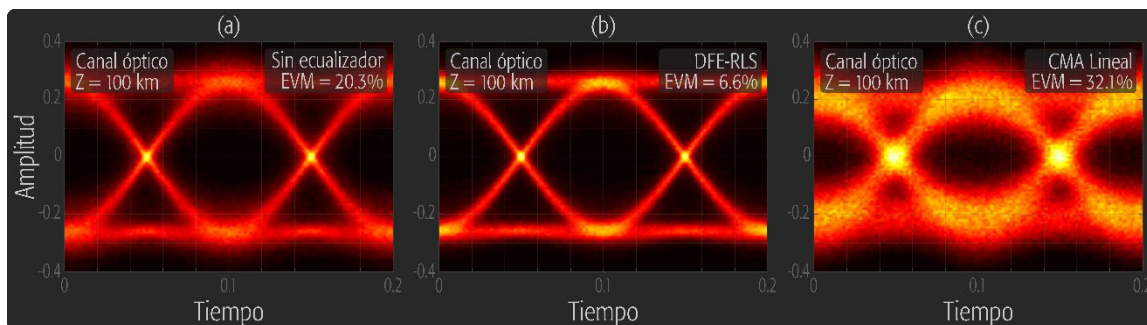


Fig. 43. Diagramas de ojo. Compensación óptica para 100 km de fibra con potencia de ruido óptico despreciable. (a) Desempeño sin ecualización, (b) Desempeño del ecualizador DFE RLS, (c) Desempeño del ecualizador CMA lineal.

El nivel de distorsión presentado en los símbolos sin ecualizar fue reducido de forma eficiente tras la ecualización DFE RLS conservando una abertura del ojo correcta. Luego de la ecualización CMA lineal, sin embargo, se evidenció un nivel de distorsión alto y acorde al visto en los diagramas de constelación en la Fig. 42(b) limitando la calidad de la transmisión.

### B. Compensación en función de la distancia del enlace óptico.

En la Fig. 44 se presentan resultados en forma de curvas de EVM vs Distancia de fibra para determinar qué tanto fue posible extender el alcance del enlace óptico en la transmisión OFDM después de aplicar cada uno de los ecualizadores. Los resultados muestran el desempeño de la ecualización teniendo como base el porcentaje aceptado de EVM fijado en 17.5%.

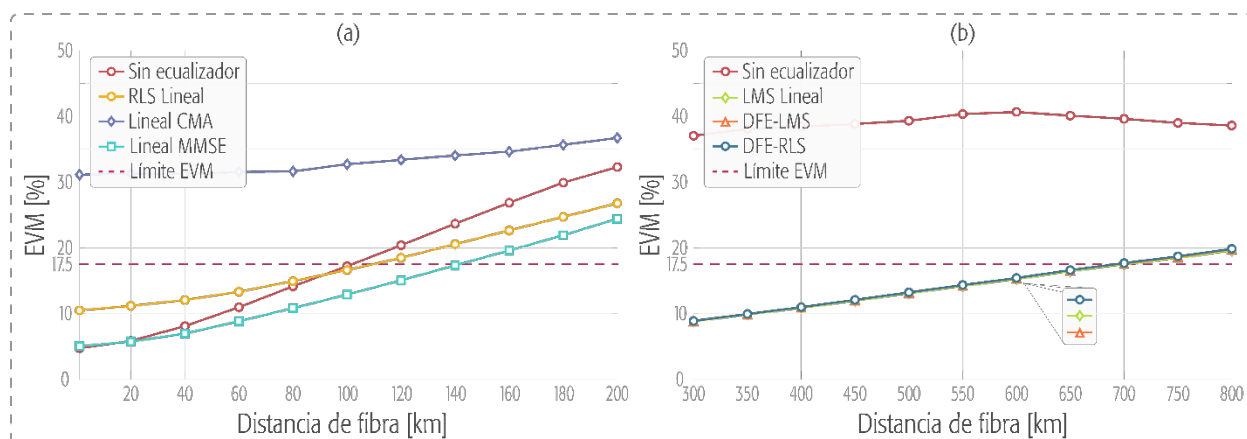


Fig. 44. Curvas de EVM vs Distancia de Fibra. Compensación óptica. (a) Desempeño de los ecualizadores RLS, CMA y MMSE lineales, (b) Desempeño de los ecualizadores DFE LMS, DFE RLS y LMS lineal.

De acuerdo con la Fig. 44(a), el ecualizador MMSE lineal mejoró considerablemente la transmisión OFDM permitiendo extender el alcance del enlace óptico desde ~100 km sin ecualización hasta ~140 km. Después de la ecualización RLS lineal, sin embargo, el desempeño de las transmisiones empeoró durante los primeros ~90 km tomando como referencia el comportamiento de la transmisión sin ecualización. A pesar de que conservaron valores de EVM aceptables en dicho rango, lo anterior indica que el desempeño de dicho ecualizador solo representó una mejora en la transmisión en un rango de 30 km de fibra óptica, desde ~90 km hasta ~120 km, lo cual lo hace un método poco práctico en este escenario. Adicionalmente, la implementación del ecualizador CMA lineal fue contraproducente, pues aportó más degradaciones en la señal de salida para todas las distancias que al no aplicar ecualización, haciendo de este un método no recomendado para mitigar los efectos de degradación aportados por la fibra óptica en un escenario de transmisión OFDM.

En contraste, los resultados del recuadro (b) obtenidos por medio de los ecualizadores LMS lineal, DFE LMS y DFE RLS ofrecieron resultados muy positivos y similares, los cuales permitieron fijar el límite óptico alcanzable en ~690 km para el escenario de simulación propuesto, asegurando el valor límite estandarizado de EVM de 17.5%.

Para ampliar la información anterior, en la Fig. 45 se presenta el diagrama de constelación resultante para la distancia máxima de fibra mencionada anteriormente (690 km), antes y después de emplear el ecualizador DFE LMS, el cual fue uno de los ecualizadores que mejor rendimiento presentó en este escenario.



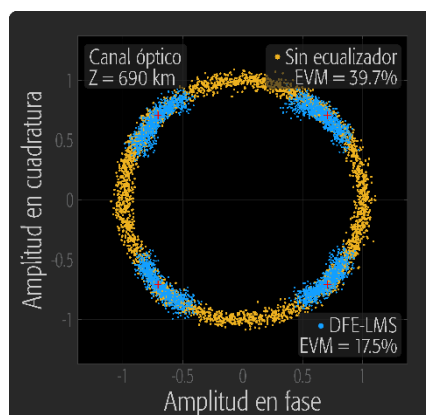


Fig. 45. Diagrama de constelación. Compensación óptica para el tramo de fibra máximo extendido con ecualización DFE RLS.

Los símbolos recibidos sin ecualizar mantuvieron un nivel de CPE invariable con respecto a las simulaciones anteriores, demostrando que es un efecto ajeno al canal óptico y proveniente del proceso de demodulación RF. Las degradaciones más significativas aportadas por la fibra fueron entonces producto del CFO, cuyo factor de distorsión se ha manifestado hasta ahora creciente en función de la ampliación del enlace óptico.

Después de la ecualización DFE LMS, se logró mitigar en gran medida el CFO arrojando un diagrama en el que los puntos de constelación de la modulación QPSK son claramente diferenciables a la vez que se logra un máximo porcentaje de EVM aceptable. Cabe destacar que, al emplear métodos de ecualización adecuados, el efecto de rotación observado en la Fig. 36 del capítulo de análisis, normalmente tiende a distribirse de forma pareja en función de los puntos de constelación, así como se aprecia en la Fig. 45, lo cual influye de forma positiva en el desempeño de EVM y así en las transmisiones ejecutadas.

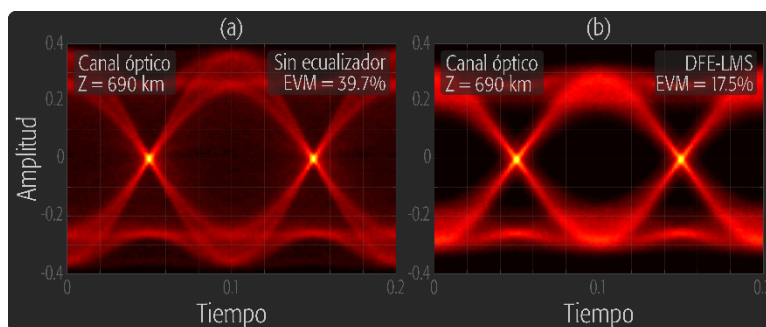


Fig. 46. Diagramas de ojo. Compensación óptica para el tramo de fibra máximo extendido. (a) Desempeño sin equalización, (b) Desempeño con equalización DFE RLS.

Finalmente, los diagramas de ojo de la Fig. 46 permiten evidenciar que hubo mejoras muy importantes después de aplicar el equalizador DFE LMS, obteniéndose un diagrama libre de distorsión en la zona central del ojo, como no sucede en el recuadro (a) al no emplear ningún método de equalización.

### 7.5.2. *Compensación del canal inalámbrico.*

En los resultados del análisis presentado en la sección 7.3.2.B, se evidenció que la transmisión OFDM presentó niveles de distorsión muy altos al emplear el canal de desvanecimiento Rayleigh de 4 taps previamente configurado. Por lo tanto, en esta sección se llevó a cabo la compensación de las degradaciones aportadas por dicho canal, cuyos resultados se presentan en la Fig. 47 por medio de curvas de BER vs  $E_b/N_0$  antes y después de emplear los equalizadores designados para este trabajo.

Las equalizaciones MMSE lineal, DFE LMS y DFE RLS arrojaron resultados muy favorables indicando una respuesta prometedora para ambientes de desvanecimiento Rayleigh, alcanzando el límite de BER recomendado ( $10^{-9}$ ) a  $\sim 25$  dB. Los equalizadores lineales LMS y RLS también mejoraron considerablemente la calidad de la transmisión y la tasa de error de bits aceptada fue lograda a  $\sim 30$  dB. Al contrario, los resultados obtenidos tras la equalización CMA lineal no indicaron una mejoría importante y el BER se tornó constante alrededor de  $\sim 10^{-4}$ .

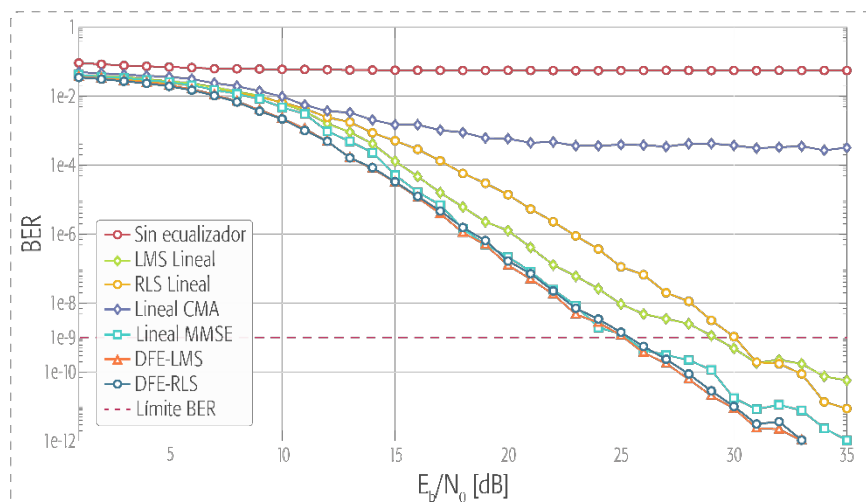


Fig. 47. Curvas de BER vs  $E_b/N_0$ . Compensación inalámbrica.

El diagrama de constelación de la Fig. 48, permite visualizar los resultados anteriores de la ecualización MMSE lineal empleando el mismo canal Rayleigh, para el cual se despreció la potencia del ruido inalámbrico indicando un valor de  $E_b/N_0$  muy alto. Después de aplicar dicho ecualizador, se recuperó el formato característico de la modulación QPSK que consiste en 4 puntos de constelación con una separación de  $90^\circ$ , característica imposible de apreciar en los símbolos sin emplear ecualización.

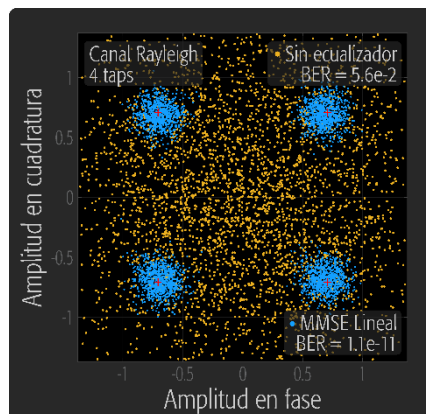


Fig. 48. Diagrama de constelación. Compensación inalámbrica con ecualización MMSE lineal.

Es importante destacar que la respuesta del ecualizador MMSE lineal mejoró con respecto a la vista anteriormente en la compensación del canal óptico en la Fig. 41, igualando en esta ocasión su desempeño al de los ecualizadores de estructura DFE, así permitiendo inferir que dicho método presenta un mejor desempeño en ambientes de degradaciones inalámbricas que en ambientes

ópticos para transmisiones OFDM; caso contrario del método LMS lineal, cuyo rendimiento disminuyó levemente en el escenario inalámbrico.

De forma similar, el diagrama de ojo de la Fig. 49 permite confirmar que el escenario de transmisión original requirió la incorporación de un bloque de ecualización en la etapa de recepción del sistema.

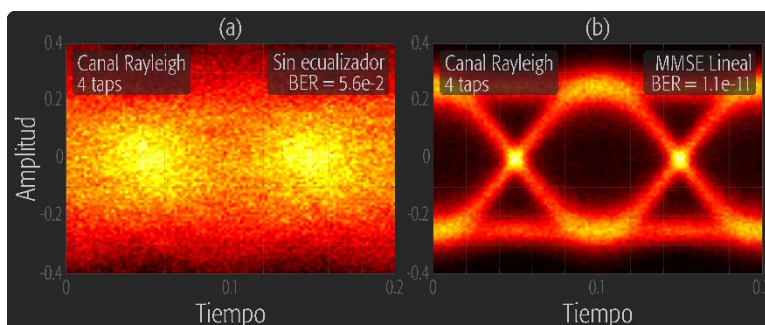


Fig. 49. Diagramas de ojo. Compensación inalámbrica. (a) Desempeño sin ecualización, (b) Desempeño con ecualización MMSE lineal.

Tras la ecualización MMSE lineal, se evidenció una correcta compensación y reconstrucción de los símbolos enviados en el dominio del tiempo, recuperando la forma característica de ojo esperada después de la aplicación de este tipo de técnicas. A pesar de la clara distorsión en la forma de ojo aún después de la compensación, se logró obtener un valor inferior al mínimo estandarizado de BER fijado en  $10^{-9}$ , indicando un resultado positivo.

### 7.5.3. Compensación del canal óptico-inalámbrico.

En los resultados del análisis de las degradaciones mostrados en 7.3.2 se evidenciaron tanto las limitaciones del canal óptico, como del canal inalámbrico de forma separada. De igual manera, en la sección 7.5.1 y 7.5.2 se llevó a cabo la compensación de dichos impedimentos independientemente. Debido a que los sistemas de transmisión actuales y los que se prevén para aplicaciones 5G abarcan ambos ambientes dispersivos, en esta sección se simuló la transmisión OFDM a través de un medio híbrido conformado por los canales óptico e inalámbrico empleados

hasta ahora y posteriormente se implementaron los ecualizadores utilizados hasta el momento con el fin de mitigar las perturbaciones presentadas en este escenario. Así, la evaluación del rendimiento de los métodos de ecualización fue llevada a cabo de acuerdo con la variación del valor de  $E_b/N_0$  en 7.5.3.A y según la distancia del tramo de fibra óptica en 7.5.3.B.

### A. Compensación en función del valor de $E_b/N_0$ .

En la Fig. 50. se presentan resultados de la transmisión OFDM en forma de curvas EVM vs  $E_b/N_0$  para un tramo de fibra de 100 km en conjunto con un canal Rayleigh de 4 taps, antes y después de implementar los ecualizadores adaptativos empleados hasta el momento.

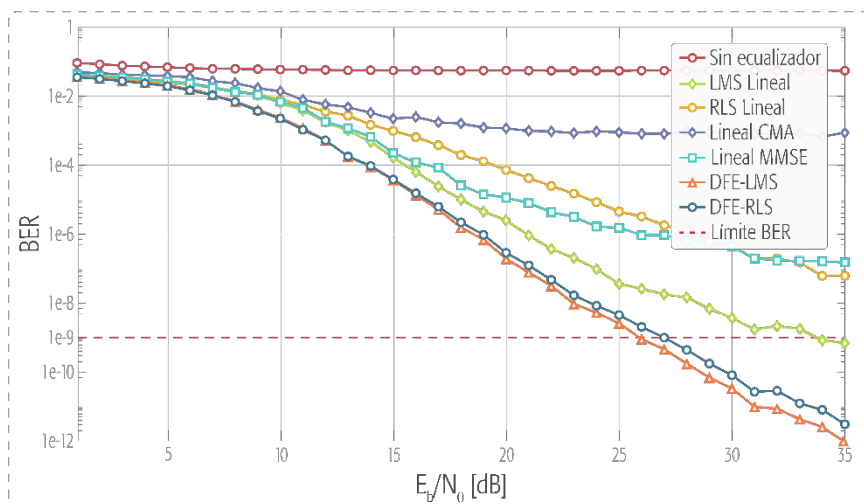


Fig. 50. Curvas de BER vs  $E_b/N_0$ . Compensación óptico-inalámbrica.

Los resultados vistos hasta el momento en capítulos anteriores, indican que la adición del canal inalámbrico ha limitado dramáticamente la calidad de los datos obtenidos en la etapa de recepción del sistema, provocando una respuesta negativa y constante en los datos de salida, por lo tanto, en el desempeño de BER, tal y como se aprecia en la figura anterior. A pesar de que todos los métodos de ecualización arrojaron mejoras con respecto a los datos sin ecualizar, es posible apreciar un rendimiento desigual entre el rendimiento de los ecualizadores lineal y los de tipo DFE, presentándose un desempeño superior por parte de los últimos.

A excepción del ecualizador LMS lineal, el cual permitió asegurar una correcta comunicación en  $\sim 34$  dB, la estructura lineal mostró un desempeño insuficiente en este tipo de escenarios teniendo como referencia el valor de BER permitido. Por el contrario, así como en los escenarios anteriores, la estructura adaptativa DFE presentó una respuesta óptima mostrando más robustez frente a la potencia de ruido agregada al canal, permitiendo consolidar las transmisiones a  $\sim 26$  y  $\sim 27$  dB para los algoritmos LMS y RLS, respectivamente.

Los diagramas de constelación de la Fig. 51 permiten comparar el desempeño de la compensación con el mismo algoritmo adaptativo (RLS) basado en las estructuras DFE y lineal.

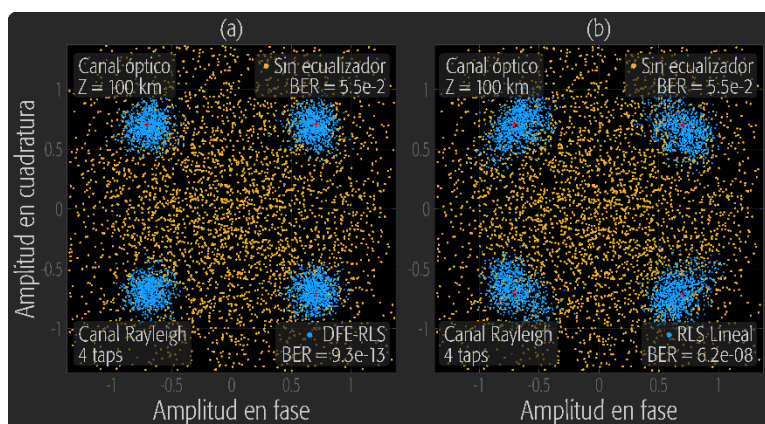


Fig. 51. Diagramas de constelación. Compensación óptico-inalámbrica con potencia de ruido óptico despreciable. (a) Desempeño con ecualización DFE RLS, (b) Desempeño con ecualización RLS lineal.

De acuerdo con los diagramas, en los símbolos sin ecualizar es imposible detectar el efecto del canal de fibra de 100 km debido a la alta distorsión aportada por el canal inalámbrico. Sin embargo, al comparar ambos resultados después de la ecualización, puede notarse una leve componente de CFO que permanece luego de la ecualización lineal, efecto que es mitigado por completo por el ecualizador DFE indicando mayor robustez por parte de este frente a la rotación de símbolos. Los diagramas permiten entonces, no solo diferenciar el desempeño de ambas estructuras adaptativas, sino evidenciar la sensibilidad del sistema frente al CFO, pues una pequeña componente de este altera de forma significativa el desempeño de BER final.

Los diagramas de ojo en la Fig. 52. muestran los resultados en el dominio del tiempo y conservan coherencia con respecto a los obtenidos anteriormente en los diagramas de constelación.

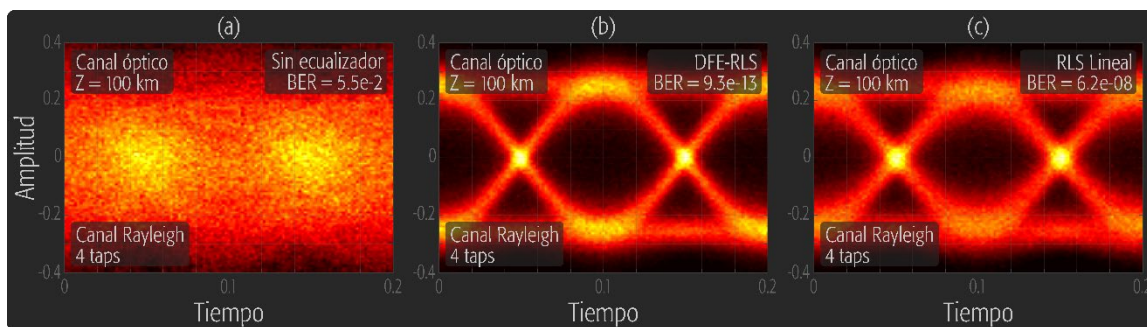


Fig. 52. Diagramas de ojo. Compensación óptico-inalámbrica con potencia de ruido óptico despreciable. (a) Desempeño sin equalización, (b) Desempeño con equalización DFE RLS, (c) Desempeño con equalización RLS lineal.

A pesar de la gran distorsión sufrida por los símbolos después de someterlos al canal híbrido, estos fueron recuperados de forma correcta luego de la equalización, especialmente al emplear la estructura DFE. Excepto por un leve aumento en la distorsión del ojo después de la equalización lineal RLS, los diagramas conservaron características similares, indicando que el mayor efecto involucrado (CFO) es difícilmente detectable por medio de diagramas de ojo.

### B. Compensación en función de la distancia del enlace óptico.

En la Fig. 53. se presentan resultados en forma de curvas de EVM vs Distancia de fibra para determinar el rango máximo de enlace de fibra con el que se obtuvo un desempeño aceptado de EVM en la transmisión OFDM para antes y después de aplicar los métodos de equalización.

En general, todos los equalizadores permitieron disminuir la distorsión en la transmisión a través del canal híbrido, sin embargo, no todos los métodos permitieron obtener un buen desempeño de EVM de acuerdo con el límite fijado en 17.5%. Los equalizadores MMSE y RLS lineales arrojaron buenos resultados a lo largo de los primeros 80 km aproximadamente, valor a partir del cual presentaron un crecimiento prolongado e indeseado en el porcentaje de EVM, particularmente en el caso del equalizador MMSE a  $\sim 200$  km. A pesar de que la equalización CMA

lineal disminuyó la distorsión en  $\sim 15\%$  en la transmisión, su desempeño fue insuficiente para garantizar transmisiones correctas y, por lo tanto, porcentajes de EVM aceptados.

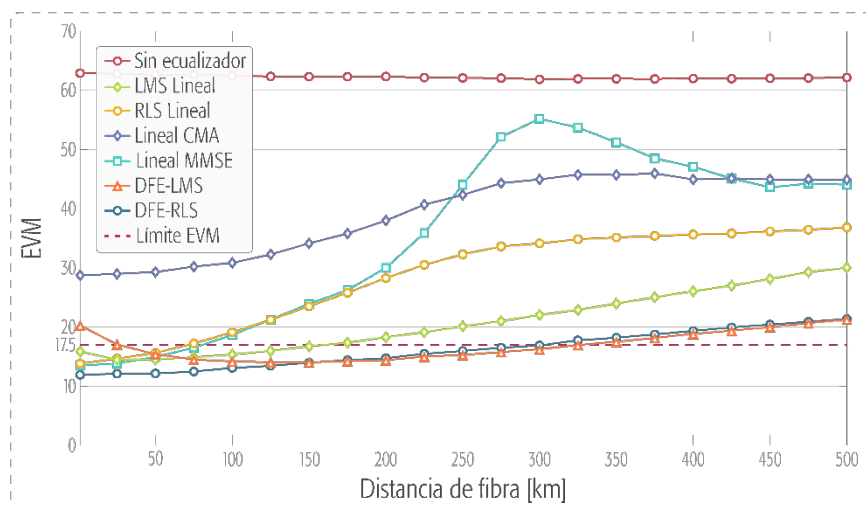


Fig. 53. Curvas de EVM vs Distancia de Fibra. Compensación óptico-inalámbrica.

El método DFE LMS mostró un comportamiento fluctuante concediendo transmisiones correctas en un rango entre  $\sim 20$  km hasta  $\sim 350$  km; dicho resultado no esperado, se debe a una lenta convergencia de los coeficientes del ecualizador durante los primeros 20 km de fibra, lo cual provocó variaciones entre el límite aceptado y no aceptado de EVM. Por último, los ecualizadores LMS lineal y DFE RLS conservaron un desempeño superior que los demás métodos, presentando valores aceptados de EVM a partir de la distancia cero hasta  $\sim 180$  km y  $\sim 320$  km, respectivamente.

Con base en los resultados anteriores, se determinó que no todos los ecualizadores presentan una respuesta óptima en el escenario de canal híbrido para todos los tramos de fibra óptica, lo cual figura como un indicador importante a la hora de elegir un método de ecualización basado en su versatilidad y practicidad frente a determinado escenario de transmisión. Adicionalmente, se estableció que el alcance óptico de las transmisiones pudo ser extendido máximo hasta  $\sim 320$  km empleando ecualización DFE RLS al enfrentarse a los impedimentos del canal óptico-inalámbrico, cumpliendo con el límite máximo de EVM estandarizado para NR.



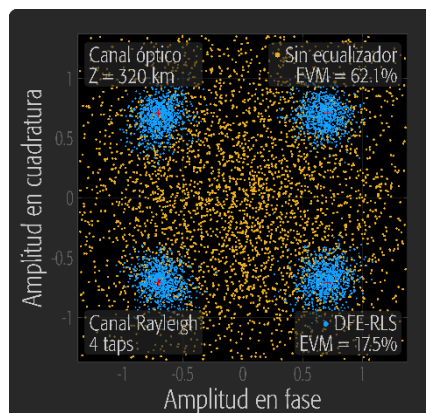


Fig. 54. Diagrama de constelación. Compensación óptico-inalámbrica para tramo de fibra máximo con equalización DFE RLS.

El diagrama de constelación en Fig. 54. muestra que la equalización DFE RLS, la cual ofreció el mejor rendimiento entre las técnicas empleadas, mitigó en gran medida los efectos aportados por ambos canales para una distancia de fibra de 320 km; tanto el CFO por parte de la fibra, como la dispersión aportada por el canal Rayleigh fueron correctamente compensados, arrojando un diagrama de constelación claro con puntos de constelación diferenciables.

Finalmente, los mismos resultados por medio de diagramas de ojo en la Fig. 55. Indican, por lo tanto, que el proceso de compensación luego de 320 km se realizó correctamente, recuperando y ordenando la información para dar como resultado un diagrama de ojo claro con distorsiones acordes al nivel de EVM obtenido.

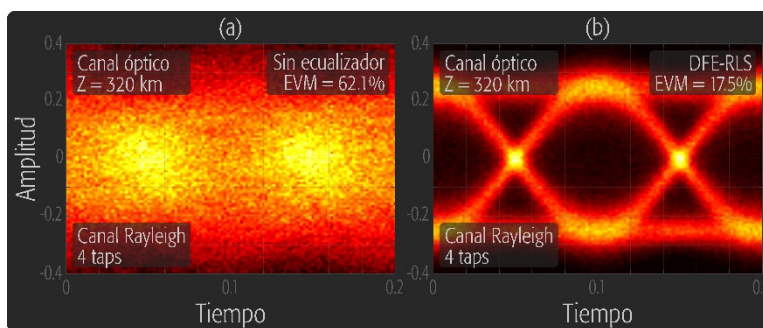


Fig. 55. Diagramas de ojo. Compensación óptico-inalámbrica para el tramo de fibra máximo extendido. (a) Desempeño sin equalización, (b) Desempeño con equalización DFE RLS.

## 7.6. Difusión de los resultados

Como resultado de este trabajo de grado se obtuvieron los siguientes productos:

### 7.6.1. Artículos aceptados en revistas científicas.

- **D. Hidalgo-Monsalve**, B. Medina-Delgado, D. Guevara-Ibarra, F. Amaya-Fernández, and J. Álvarez-Guerrero, “Carrier Frequency Offset compensation method for 5G-based Radio-over-Fiber transmissions,” sometido a revisión en el *Journal of Physics: Conference Series* del IOPscience, octubre 2020 (Anexo 1. Paper 1).

### 7.6.2. Artículos preparados para sometimiento.

- **D. Hidalgo-Monsalve**, B. Medina-Delgado, D. Guevara-Ibarra, F. Amaya-Fernández, and J. Álvarez-Guerrero, “Análisis de los efectos dispersivos en un escenario de Radio-sobre-Fibra con características de la red 5G,” (Anexo 2. Paper 2).

### 7.6.3. Ponencias realizadas en eventos.

- **D. Hidalgo-Monsalve**, B. Medina-Delgado, F. Amaya-Fernández, and J. Álvarez-Guerrero, “Análisis de un escenario de Radio-sobre-Fibra como propuesta para soportar los requerimientos de la red 5G,” en la *VI International Week of Science, Technology and Innovation* de la Universidad Francisco de Paula Santander, noviembre 2019 (Anexo 3. Ponencia 1).
- **D. Hidalgo-Monsalve**, B. Medina-Delgado, D. Guevara-Ibarra, F. Amaya-Fernández, and J. Álvarez-Guerrero, “Compensación del Desplazamiento de Frecuencia de Portadora en transmisiones de Radio-sobre-Fibra con características de red 5G,” en la *VII International Week of Science, Technology and Innovation* de la Universidad Francisco de Paula Santander, octubre 2020 (Anexo 4. Ponencia 2).

## 8. Conclusiones

En este trabajo de investigación se simuló mediante MATLAB un escenario de Radio-sobre-Fibra (RoF) en el que se analizaron y compensaron las degradaciones de un canal óptico-inalámbrico sobre la transmisión de una señal OFDM diseñada con base en las especificaciones técnicas del 3GPP, las cuales ofrecen soporte al estándar 5G New Radio (NR), mientras que los canales óptico e inalámbrico se modelaron utilizando un modelo de propagación de ondas ópticas y una distribución de desvanecimiento Rayleigh, respectivamente.

Con base en la sección 7.3.2.A, donde se incluyó el ruido óptico aportado por el canal AWGN en la Fig. 33, se demostró que las transmisiones en el rango entre 0 y 20 km sugerido para servicios de baja latencia para NR, presentan un desempeño casi invariable y arrojan valores óptimos en el desempeño de BER. Se determinó también que la transmisión de señales OFDM para distancias de fibra entre dicho rango pueden ser llevadas a cabo de forma exitosa siempre y cuando el parámetro  $E_b/N_0$  tome valores superiores a 14 dB. Por el contrario, se determinó que las simulaciones a 100 km de fibra no brindan escenarios de transmisión viables para el tipo de señal que se construyó, ya que no se obtuvieron resultados de BER debajo del límite aceptado de  $10^{-9}$ , necesario para garantizar fidelidad en la calidad de la información enviada.

Más adelante en la misma sección, al despreñar el ruido óptico y evaluar mediante diagramas de constelación, se demostró que la degradación más importante obtenida tras la transmisión por el medio óptico fue el Desplazamiento de Frecuencia de Portadora (CFO) como rotación de símbolos en el plano I/Q, mientras que la Dispersión Cromática no tuvo incidencia significativa en el desempeño del sistema debido a la característica principal de ortogonalidad de la forma de onda OFDM, la cual le atribuye una alta inmunidad frente a dicho efecto. El CFO, sin embargo, produjo Interferencia Interportadora (ICI), corrompiendo así la comunicación y

conllevando a bajos desempeños de BER y EVM. De esta forma, las transmisiones a 1, 20 y 60 km pueden ser llevadas a cabo para NR ofreciendo valores de EVM aceptables, mientras que el CFO tuvo un impacto negativo importante en el desempeño de EVM a 100 km, arrojando medidas fuera del límite estandarizado fijado en 17.5%. En este último escenario, la ortogonalidad entre subportadoras fue alterada significativamente, conllevando a un nivel de ICI suficiente para imposibilitar la transmisión.

Una vez en 7.3.2.B, el canal de desvanecimiento Rayleigh aportó un alto nivel de degradaciones sobre la transmisión de la señal OFDM, que se vio reflejado como una dispersión abrupta de los símbolos enviados, limitando en gran medida el desempeño del sistema de comunicaciones planteado. Debido a estos resultados, se determinó que las transmisiones OFDM no podrían ser llevadas a cabo con un buen desempeño a través de dicho canal, a menos de incluir un bloque adicional de compensación en la etapa de recepción.

Para solucionar esto, en 7.4 se propusieron ecualizadores lineales y de decisión retroalimentada (DFE) como métodos para mitigar la ICI en las transmisiones OFDM. Dichos ecualizadores fueron apoyados en los algoritmos adaptativos de Módulo Constante (CMA), Cuadrado Mínimo Recursivo (RLS), Cuadrado de la Media Mínima (LMS) y Mínimo Error Cuadrado Medio (MMSE), con los que fue posible mejorar en el mayor de los casos el desempeño del sistema RoF de acuerdo con las mediciones de BER y EVM.

Después de implementar los ecualizadores adaptativos en 7.5.1.A de acuerdo con la variación del ruido óptico generado por el canal AWGN, se vio un notable mejoramiento en el desempeño de la transmisión después de la ecualización, particularmente luego de emplear ecualizadores de decisión retroalimentada LMS y RLS, al igual que el ecualizador lineal RLS, con los cuales fue posible consolidar las transmisiones en un rango entre 14 y 15 dB asegurando valores

de BER aceptables. Con los ecualizadores RLS y MMSE lineales se optimizó de forma similar la transmisión, aunque con un recargo de alrededor de +4 dB. En contraste, aplicar el ecualizador lineal CMA no presentó ninguna mejora, incluso llevó al sistema a presentar un desempeño menos favorable que al no usar métodos de compensación, debido a que las señales OFDM no cumplen con conservar una forma de onda constante, lo cual figura como el requisito central del algoritmo CMA.

En la sección 7.5.1.B se removió el ruido óptico del canal AWGN para determinar qué tanto fue posible extender el alcance del enlace óptico en la transmisión OFDM después de aplicar cada uno de los ecualizadores. En esta sección, los resultados obtenidos por medio de los ecualizadores LMS lineal, DFE LMS y DFE RLS sobresalieron, ofreciendo resultados muy positivos y similares, los cuales permitieron fijar el límite óptico alcanzable en ~690 km para el escenario de simulación propuesto, asegurando el valor límite estandarizado de EVM de 17.5%.

Más adelante, al eliminar el canal óptico y solo incluir las degradaciones del canal de desvanecimiento Rayleigh en 7.5.2, todos los ecualizadores a excepción del basado en CMA, arrojaron resultados muy favorables indicando una respuesta prometedora para ambientes de desvanecimiento Rayleigh, alcanzando el límite de BER recomendado ( $10^{-9}$ ) en un rango entre ~25 dB y ~30 dB. En este escenario, nuevamente los ecualizadores de decisión retroalimentada predominaron en el mejoramiento del desempeño del sistema, permitiendo inferir que su funcionamiento arroja resultados positivos tanto en canales ópticos como inalámbricos.

En la compensación de los efectos de degradación aportados por el canal híbrido óptico-inalámbrico en función de la variación del ruido externo AWGN en la sección 7.5.3.A, la estructura de ecualización lineal mostró un desempeño insuficiente en este tipo de escenarios teniendo como referencia el valor de BER permitido. Por el contrario, la estructura adaptativa DFE siguió

presentando una respuesta óptima mostrando más robustez frente a la potencia de ruido agregada al canal, permitiendo consolidar las transmisiones a  $\sim 27$  dB para los algoritmos LMS y RLS.

En la compensación en función de la distancia en 7.5.3.B, se determinó con base en los resultados que no todos los ecualizadores presentan una respuesta óptima en el escenario de canal híbrido a medida que los tramos de fibra óptica aumentan. De esta manera, se concluyó que la estabilidad de un ecualizador figura como un indicador importante a la hora de elegir un método de ecualización frente a determinado escenario de transmisión. Adicionalmente, se estableció que el alcance óptico de las transmisiones pudo ser extendido máximo hasta  $\sim 320$  km empleando ecualización DFE RLS al enfrentarse a los impedimentos del canal óptico-inalámbrico, cumpliendo con el límite máximo de EVM estandarizado para NR.

Con base en los resultados expresados anteriormente, se determinó que la opción de compensación más apropiada dentro de los métodos empleados corresponde a la estructura de Ecualización por Decisión Retroalimentada (DFE) empleando el algoritmo adaptativo de Cuadrado Mínimo Recursivo (RLS). Por medio de este, las degradaciones del medio óptico e inalámbrico fueron correctamente compensadas, lo cual permitió extender el enlace óptico en un  $\sim 700\%$  y en un  $\sim 320\%$  al incluir el canal de desvanecimiento Rayleigh. Mediante la ecualización del DFE-RLS, se logró una importante mitigación de la CFO, asegurando comunicaciones correctas de acuerdo con medidas del BER y EVM. De esta manera, se puede concluir que dicha técnica de ecualización adaptativa es un candidato prometedor para la cancelación de ICI en sistemas RoF sobre transmisiones OFDM basadas en 5G NR.

### Referencias bibliográficas

- 5G-PHOS. (2016). *H2020 5GPPP Phase II*. <http://www.5g-phos.eu/>
- 5G wireless fronthaul requirements in a passive optical network context. (2019). In *International Telecommunication Union*. International Telecommunication Union (ITU). <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.Sup66-201907-I>
- Agrawal, G. P. (2010). *Fiber-Optic Communication Systems* (Third). John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9780470611388>
- Agrawal, G. P. (2013). *Nonlinear Fiber Optics*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/C2011-0-00045-5>
- Aguirre, K., Restrepo, F., Velásquez, J., Álvarez, J., Betancur, L., & Amay, F. (2015). Implementación de una propuesta de Radio sobre Fibra para la comunicación de redes móviles basadas en Femtoceldas. *Colombian Conference on Communications and Computing – COLCOM 2015, April, 5*.
- Álvarez, J., & Amaya, F. (2015). Impacto de los efectos lineales y no lineales en el requerimiento del ancho de línea del transmisor en sistemas WDM-DPSK. *Revista UIS Ingenierías*, 14(2), 35–45. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.18273/revuin.v14n2-2015004>
- Álvarez, J., Medina, B., Milena, C., Imbett, S., & Guerrero, N. (2011). Compensación digital de la dispersión cromática en sistemas de comunicaciones ópticas basados en algoritmos CMA y MMSE. *Receptor*, September.
- Asplund, H., Astely, D., von Butovitsch, P., Chapman, T., Frenne, M., Ghasemzadeh, F., Hagström, M., Hogan, B., Jöngren, G., Karlsson, J., Kronstedt, F., & Larsson, E. (2020). *Advanced Antenna Systems for 5G Network Deployments* (P. von Butovitsch (Ed.); Issue

- November). Elsevier Ltd. <https://www.ericsson.com/en/white-papers/advanced-antenna-systems-for-5g-networks>
- Bishop, O. (2011). *Electronics Circuits and Systems* (Fourth). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-096634-2.00042-6>
- Carrera, A., & Jiménez, M. (2015). Estudio y Simulación del Efecto No Lineal Automodulación de Fase en Fibras Ópticas Monomodo. *Politécnica*, 35(1), 1–12.
- Chapman, T., Larsson, E., von Wrycza, P., Dahlman, E., Parkvall, S., & Sköld, J. (2015). HSPA evolution: The fundamentals for mobile broadband. In *HSPA Evolution: The Fundamentals for Mobile Broadband*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/C2013-0-12896-6>
- Characteristics of a single-mode optical fibre and cable, G.652*. (2016). International Telecommunication Union. <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.652-201611-I/en>
- Characteristics of a single-mode optical fibre and cables. (2016). In *International Telecommunication Union*. International Telecommunication Union (ITU-T).
- Effenberger, F., Cleary, D., Haran, O., Kramer, G., Li, R. D., Oron, M., & Pfeiffer, T. (2007). An introduction to PON technologies. *IEEE Communications Magazine*, 45(3), 17–25. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2007.344582>
- Farhang-Boroujeny, B. (2013). *Adaptive Filters: Theory and Applications* (second, Vol. 369, Issue 1). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Fette, B. (2009). Cognitive Radio Technology. In *Cardiovascular Imaging* (Second edi, Vol. 27, Issue 7). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-1-4160-5009-4.50004-2>
- Frenzel, L. (2016). *Principles of Electronic Communication Systems* (Fourth). McGraw-Hill Education.



- Ghassemlooy, Z., Popoola, W., & Rajbhandari, S. (2018). *Optical Wireless Communications: System and Channel Modelling with MATLAB®* (2da ed.). Taylor & Francis Group, LLC.
- Granada Torres, J. J., Serpa Imbett, C. M., Varón Durán, G. M., & Guerrero González, N. (2011). Hacia la próxima generación de sistemas de Radio sobre Fibra de banda ancha: retos tecnológicos en la banda de las ondas milimétricas. *Revista Científica Ingeniería y Desarrollo*, 29(2), 242–265.
- Irshaad, F. (2017). Calibration of Estimated BER from Error Vector Magnitude with Carrier Phase Recovery. *Re. Adv. Pho. Opt.*, 1(1), 1–6. <https://doi.org/10.36959/665/314>
- ITU. (2017). *Report ITU-R M.2412-0: Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-2020* (Vol. 0).
- Jeruchin, M. C., Balaban, P., & Shanmugan, K. S. (2000). *Simulation of Communication Systems: Modeling, Methodology, and Techniques* (J. K. Wolf (Ed.); Second).
- Konstantinou, D., Morales, A., Rommel, S., Raddo, T. R., Johannsen, U., & Monroy, I. T. (2019). Analog Radio Over Fiber Fronthaul for High Bandwidth 5G Millimeter-Wave Carrier Aggregated OFDM. *2019 21st International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, 1–4. <https://doi.org/10.1109/ICTON.2019.8840525>
- Kumar, S., Bharti, S., Kumar, S., & Singh, D. (n.d.). *Passive Optical Network : A Critical Review*. 199–203.
- Lannoo, B., Dixit, A., Colle, D., Bauwelinck, J., Dhoedt, B., Jooris, B., Moerman, I., Pickavet, M., Rogier, H., Simoens, P., Torfs, G., Vande Ginste, D., & Demeester, P. (2015). Radio-over-fibre for ultra-small 5G cells. *International Conference on Transparent Optical Networks, 2015-Augus*, 2–5. <https://doi.org/10.1109/ICTON.2015.7193591>

López, J., Tovar, A., Ordóñez, H., & Agredo, J. P. (2011). Efectos no lineales y su relación con los parámetros de transmisión de una red WDM. *Revista Facultad de Ingeniería, UPTC*, 20(31), 23–35. <https://doi.org/10.1016/j.cden.2012.05.008>

MathWorks. (2020). *Communications Toolbox User's Guide*. The MathWorks, Inc.

Miah, K., & Potter, D. K. (2017). A Review of Hybrid Fiber-Optic Distributed Simultaneous Vibration and Temperature Sensing Technology and Its Geophysical Applications. *Sensors (Switzerland)*, 17(11), 1–25. <https://doi.org/10.3390/s17112511>

Millán, R. (2015). NG-PON (Next Generation Passive Optical Networks). *GM2 Publicaciones Técnicas S.L.*, 8–10.

Moon, S. R., Hwang, I.-K., Kang, H.-S., Chang, S.-H., Lee, S.-W., & Lee, J. K. (2017). CFO compensation method using optical feedback path for coherent optical OFDM system. *Optical Fiber Technology*, 36, 181–186. <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2017.03.017>

NR; Base Station (BS) Radio Transmission and Reception. (2020). In *3rd Generation Partnership Project*. 3rd Generation Partnership Project (3GPP).

NR; Physical channels and modulation. (2020). In *3rd Generation Partnership Project*. 3rd Generation Partnership Project (3GPP).

Oswaldo, M.-O. R., Arturo, C.-M. M., Adolfo, P.-L. G., & Arturo, S.-F. C. (2015). Generación de señales para sistemas radio sobre fibra basados en combinación óptica. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 16(4), 585–598. <https://doi.org/10.1016/j.riit.2015.09.010>

Peralta-Sevilla, A., Tipán-Simbaña, M., & Amaya-Fernández, F. (2014). Análisis de los efectos dispersivos y no lineales en un canal óptico empleando métodos numéricos. *Ingenius, Revista de Ciencia y Tecnología*, Enero-Juni(11), 5–17.

- Phosnet Researchgroup. (2018). *H2020 5GPPP Phase II Project - YouTube*.  
<https://www.youtube.com/watch?v=shubgabZUTE>
- Shih, P. T., Lin, C. T., Jiang, W. J., Chen, Y. H., Chen, J. J., & Chi, S. (2009). Full duplex 60-GHz RoF link employing tandem single sideband modulation scheme and high spectral efficiency modulation format. *Optics Express*, *17*(22), 19501–19508.  
<https://doi.org/10.1364/oe.17.019501>
- Tafur Monroy, I., Guerrero Gonzalez, N., Caballero Jambrina, A., Prince, K., Zibar, D., Gibbon, T. B., Yu, X., & Jensen, J. B. (2009). Convergencia de sistemas de comunicación Ópticos e inalámbricos. *Optica Pura y Aplicada*, *2*, 83–90.
- Tomasi, W. (2001). *Sistemas de Comunicaciones Electrónicas* (Cuarta). PRENTICE HALL.
- Turitsyn, S. K., Prilepsky, J. E., Le, S. T., Wahls, S., Frumin, L. L., Kamalian, M., & Derevyanko, S. A. (2017). Nonlinear Fourier transform for optical data processing and transmission: advances and perspectives. *Optica*, *4*(3), 307–322.  
<https://doi.org/10.1364/OPTICA.4.000307>
- Vázquez, S., Ramírez, B., & Anzueto, J. (n.d.). Solución numérica de la ecuación no lineal de Schrödinger. *SOMI Congreso de Instrumentación*, 1–8.
- Walsh, D., Moodie, D., Mauchline, I., Conner, S., Johnstone, W., & Culshaw, B. (2005). Practical bit error rate measurements on fibre optic communications links in student teaching laboratories. *Ninth International Topical Meeting on Education and Training in Optics and Photonics*, 9664(96642I), 1–15. <https://doi.org/10.1117/12.2207674>
- Yang, H.-C. (2018). *Introduction to Digital Wireless Communications* (1ra ed.). The Institution of Engineering and Technology. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

Zaidi, A. A., Baldemair, R., Tullberg, H., Björkegren, H., Sundström, L., Medbo, J., Kilinc, C., &

Da Silva, I. (2016). Waveform and Numerology to Support 5G Services and Requirements.

*IEEE Communications Magazine*, 54(11), 90–98.

<https://doi.org/10.1109/MCOM.2016.1600336CM>

Zin, A. M., Bongsu, M. S., Idrus, S. M., & Zulkifli, N. (2010). *An Overview of Radio-over-Fiber*

*Network Technology*. 0–2.

## Anexos

# Anexo 1. Paper 1: Compensation of frequency mismatch between transmitter and receiver local oscillators to enhance 5G-based Radio-over-Fiber transmissions

**D. Hidalgo-Monsalve**, B. Medina-Delgado, D. Guevara-Ibarra, F. Amaya-Fernández, and J. Álvarez-Guerrero, “Compensation of frequency mismatch between transmitter and receiver local oscillators to enhance 5G-based Radio-over-Fiber transmissions,” artículo aceptado en el *Journal of Physics: Conference Series* del IOPscience, octubre 2020.

---

## Fwd: Proofs of ED-02 [VII IWSTI -JPCS]

1 mensaje

---

**DÚMAR HIDALGO MONSALVE** <dumarhmhim@ufps.edu.co>  
Para: Dúmar Hidalgo <dumarhidalgomonsalve@outlook.com>

13 de octubre de 2020, 22:23

Dear autor

Thank you for publishing with Journal of Physics: Conference Series (JPCS). We are pleased to inform you that the proof for your upcoming publication is ready for review (see your manuscript send in the attachment). You must make corrections directly on through PDF file through remark review.

We ask you to check that you are satisfied with the accuracy of the copy-editing, and with the completeness and correctness of the text, the title, authors name, authors affiliation, tables, figures, and acknowledgments. Any correction after your article is online published, you must bear the corrections-cost.

Once you make reviews, please, send me your remarks until **October 13** de 2020

We will do everything possible to get your article published accurately between 8-10 weeks.

We very much look forward to your response.

Yours sincerely,  
Cordial saludo,

**Leidy Marcela Dueñas Ramírez, Editor Section**

**Ely Dannier V. Niño, Editor**

JPCS Chief Editor for **VII International Week of Science, Technology & Innovation (7th IWSTI).**

Fundación of Researchers in Science and Technology of Materials (FORISTOM)

<http://foristom.org/5imrmpt>

--


**Leidy Marcela Dueñas Ramírez**

Section Editor

Fundación of Researchers in Science and Technology of Materials (FORISTOM)

<http://foristom.org/5imrmpt>

---

 **ED-02-NN.pdf**  
2180K

# Compensation of frequency mismatch between transmitter and receiver local oscillators to enhance 5G-based Radio-over-Fiber transmissions

D Hidalgo-Monsalve<sup>1</sup>, B Medina-Delgado<sup>1</sup>, D Guevara-Ibarra<sup>1</sup>, F Amaya-Fernández<sup>2</sup> and J Álvarez-Guerrero<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Universidad Francisco de Paula Santander, San José de Cúcuta, Colombia

<sup>2</sup> Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombia

<sup>3</sup> Universidad Libre, San José de Cúcuta, Colombia

E-mail: dumarhnhim@ufps.edu.co

**Abstract.** Radio-over-Fiber is a cost-effective support for the forthcoming 5G developments aimed to fulfill the ever-increasing demand for information. However, such systems are limited by transmission impairments that reduce the quality of communication. To enhance the system performance, an adaptive Decision-Feedback Equalizer based on the Least Mean Square algorithm is proposed in this work to compensate for frequency mismatch in the transmitter and receiver local oscillators in a Radio-over-Fiber transmission scenario when considering the latest 5G New Radio standard. Simulation results in MATLAB exhibit a major impact from the equalization technique in improving the system performance in the presence of such a frequency offset, allowing the optical link to be extended from ~100 km with no equalizer up to ~690 km after equalization. Thus, it was demonstrated that the proposed adaptive equalization technique is a promising contender to enhance 5G-based Radio-over-Fiber data transmissions.

## 1. Introduction

High bandwidth consuming applications like ultra-high-quality video broadcasting and virtual reality services are being increasingly incorporated into a new demand profile in which high data rates and low latency are paramount. 5G New Radio (NR) is the starting point in the global standardization of the 5th generation of mobile technologies proposed by the 3rd Generation Partnership Project (3GPP) in 2016, which aims to meet the growing demand for information [1]. Radio-over-Fiber (RoF) is a promising network architecture for supporting NR requirements and expanding the radio coverage. However, such an approach is normally limited by degradations during the data transmission. One of them is the Carrier Frequency Offset (CFO), which causes the spectral components at the edge of the data signal spectrum to be lost. This effect is due to a frequency mismatch in the transmitter and receiver local oscillators, which leads to Intercarrier Interference (ICI) in RoF-based data transmissions, giving rise to Bit Error Rate (BER) and Error Vector Magnitude (EVM) poor performance [2].

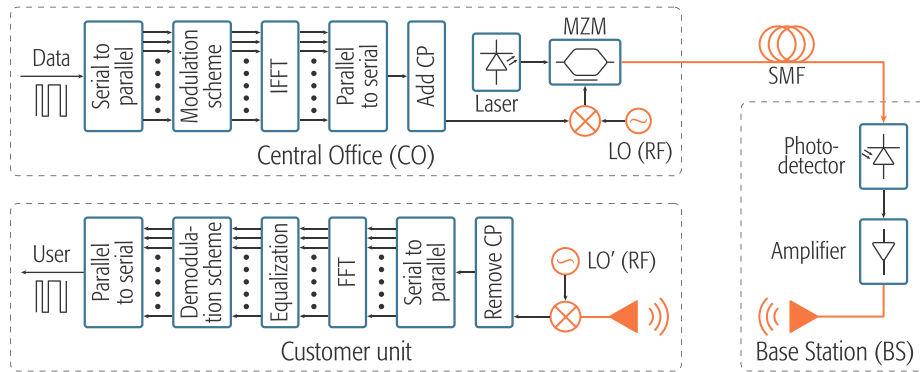
In related research such as [1], the important role RoF systems have in supporting both backhaul and fronthaul networks in future 5G developments is stated. In [3], Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) is depicted as a formidable choice for all link types in NR according to several key performance indicators. Finally, in [4] adaptive equalization is exhibited as an effective technique for optical impairments mitigation.

Thus, in this paper a Decision-Feedback Equalizer (DFE) based on the Least Mean Square (LMS) algorithm is proposed to compensate the CFO in 5G-based OFDM transmissions. By using this method, the frequency disparity in the transmitter and receiver oscillators is corrected, allowing the optical link to be extended from  $\sim 100$  km with no equalization up to  $\sim 690$  km after adaptive equalization, achieving Bit Error Rate values below  $10^{-9}$ , thus showing the effectiveness of the proposed equalization method in improving the system performance.

The rest of the paper is organized as follows: the methods and parameters used in the simulations are specified in section 2, the simulation results and analysis are described in section 3 while section 4 summarizes the paper and states the major conclusions.

## 2. Methods and simulation parameters

RoF is generally performed by using Intensity Modulation with Direct Detection (IM/DD) in conjunction with OFDM for data transmission purposes, as depicted in Figure 1 from [5]. OFDM transmission starts when data is serial-to-parallel converted and mapped using a modulation scheme. Then, the resulting symbols are modulated onto OFDM subcarriers in an Inverse Fast Fourier Transform (IFFT) block and later rearranged into serial frames allowing for Cyclic Prefix (CP) insertion, which is generally added for protecting adjacent subcarriers from ICI [6]. Afterwards, the OFDM signal is radio-frequency (RF) modulated by using a Local Oscillator (LO) before performing the IM/DD transmission.



**Figure 1.** Block diagram of the IM/DD OFDM transmission.

In the IM/DD transmitter, a laser optical output is intensity-modulated by the RF-OFDM signal through an external device called Mach Zehnder Modulator. The signal is then sent through a single-mode fiber (SMF) from a Central Office (CO), and later detected by a photodetector in a Base Station (BS) from which is amplified and retransmitted through the wireless medium [7]. At the receiver part or customer unit, the same steps in the CO are executed in reverse order, commonly including an equalization stage for compensation purposes in between the FFT, and demodulation scheme blocks to subsequently deliver the resulting data to users.

The approach shown in Figure 1 was used in this work to perform the OFDM transmissions, by using the MATLAB's communication toolbox in [8]. Despite RoF systems usually including both optical and wireless channels in 5G applications, this work was focused on the optical range limitations due to the CFO; hence, the wireless path was not simulated.

### 2.1. Orthogonal frequency division multiplexing waveform

To generate the OFDM waveform, Quadrature Phase Shift Keying (QPSK) was selected instead of higher-order modulation schemes so as to provide a large optical coverage at the expense of a limited bit rate. Moreover, NR brings a variety of OFDM waveform numerologies, as shown in Table 1, from [3]. According to such numerologies, the IFFT block size and the number of CP samples must be kept in any transmission scenario to meet the NR requirements, while the subcarrier spacing, the CP duration and the frequency ranges are variable in order to support a large number of services.



**Table 1.** Numerologies supported in 5G New Radio

Subcarrier spacing (kHz)	IFFT block size	CP duration ( $\mu$ s)	CP samples	Frequency Ranges (GHz)
15	4096	4.69	288	$\leq 6$
30	4096	2.35	288	$\leq 20$
60	4096	1.17	288	$\leq 40$
240	4096	0.29	288	$> 40$

Since forward 5G applications are thought to be contained in the higher RF band, simulations were performed by using a 50 GHz RF carrier, indicating a 240 kHz subcarrier spacing, a 4096-point IFFT/FFT block and 288 CP samples at 0.29  $\mu$ s [3].

### 2.2. Optical channel

The SMF link was simulated by using the optics wave propagation model presented in [9] and shown in Equation (1), where  $A$  represents the amplitude envelope,  $z$  is the fiber length and  $t$  is the time [9].

$$j \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} - \frac{\beta_3}{6} \frac{\partial^3 A}{\partial t^3} = - \frac{\partial A}{\partial z} \quad (1)$$

Only second order dispersion  $\beta_2 = -21.682 \text{ ps}^2/\text{km}$  and third order dispersion  $\beta_3 = 0.117 \text{ ps}^3/\text{km}$  were considered according to an operation wavelength of  $\lambda = 1550 \text{ nm}$ , whose value is defined in ITU-T G.652 about the characteristics of a single-mode optical fiber cable [10]. The model made it possible to omit the use of the optical devices illustrated in Figure 1, while preserving the principle of the IM/DD technique. This allowed the transmission to be freed from external noise added by such devices, thus focusing the results on the effects on the information due to CFO.

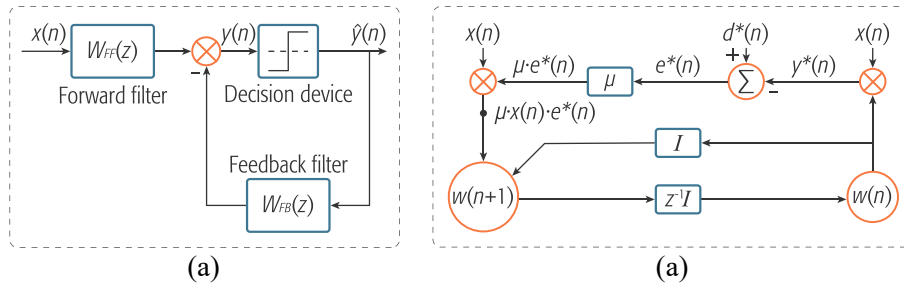
Furthermore, an Additive White Gaussian Noise (AWGN) channel was modelled by using the normal distribution presented in [11] as shown in Equation (2), where  $\delta$  is the mean,  $x$  is the optical signal output, and  $\sigma^2$  is the variance.

$$\rho(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \cdot \exp\left(-\frac{(x - \delta)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2)$$

In this model, the parameter  $\delta$  is typically assumed as zero in electronic systems, while  $\sigma^2$  takes different values according to  $\sigma^2 = P/10^{SNR/10}$ , where  $SNR$  is the signal-to-noise ratio and  $P$  is the signal power of  $x$ . The AWGN channel was required in the simulations to determine the achievable transmission coverage when facing optical noise power variation.

### 2.3. Equalization method

The DFE structure is depicted in Figure 2(a) from [12]. It consists of a forward filter  $W_{FF}(z)$  and a feedback filter  $W_{FB}(z)$ , which compensate the frequency disparity in the transmitter and receiver oscillators by equalizing the symbols affected during the transmission.



**Figure 2.** DFE LMS equalization. (a) DFE block diagram, (b) LMS signal flow-graph.

The forward filter  $W_{FF}(z)$  was used to transform the input symbol vector  $x(n)$  into equalized symbols  $y(n)$  which were then detected by a symbol detector, namely, a decision device, whereas the feedback filter  $W_{FB}(z)$  was later fed with such detected symbols  $\hat{y}(n)$  to perform the frequency mismatch compensation. For this purpose, the DF equalizer uses a number of taps, which were updated in this work by using the LMS algorithm according to the Equation (3) from [11], where  $w(n+1)$  is the new tap,  $\mu$  is equalizer convergence and the asterisk denotes the complex conjugate. The error calculation is  $e(n) = d(n) - y(n)$ , in which  $d(n)$  is the desired signal and  $y(n)$  is the output signal.

$$w(n+1) = w(n) + \mu \cdot x(n) \cdot e^*(n) \quad (3)$$

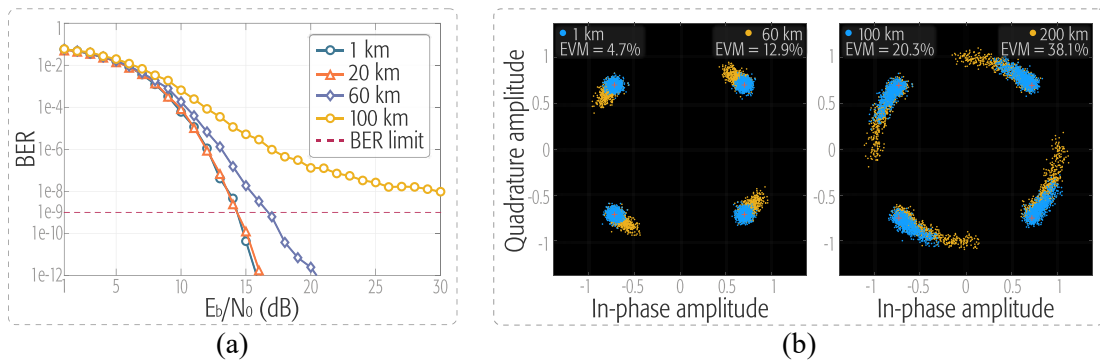
The Figure 2(b) illustrates the LMS algorithm signal flow-graph, in which  $I$  is the identity matrix and  $z^{-1}$  is the unit-time delay operator. It shows that a conjugated output vector  $y^*(n)$  is computed in response to the detected DFE symbols  $x(n)$ . This leads to the error signal generation by subtracting  $y^*(n)$  from  $d^*(n)$ , while the current symbol  $w(n)$  is updated according to the term  $\mu \cdot x(n) \cdot e^*(n)$ . In this manner, the new equalized symbol  $w(n+1)$  is produced to complete the LMS adaptation cycle. The parameter  $\mu$  was set at 0.01 in the simulations in order to preserve a fast equalizer convergence, whereas the number of feedback and forward taps were set at 8 and 10, respectively.

### 3. Simulation results and analysis

The results were focused on showing how the transmission of an OFDM signal was affected by the CFO in an RoF scenario, whose analysis was carried out in section 3.1, whereas the transmission performance was evaluated before and after equalization in section 3.2.

#### 3.1. Effect of carrier frequency offset

To analyze the CFO impact on the OFDM transmission, Figure 3(a) shows BER curves as a function of  $E_b/N_0$  (energy per bit to noise power spectral density ratio) variation through different fiber lengths stated at 1 km, 20 km, 60 km and 100 km. According to [13], the minimum BER allowed to guarantee a correct transmission in telecommunications is around  $10^{-9}$ . On the other hand, constellation diagrams are presented in Figure 3(b) to qualitatively witness the CFO impairments on the received symbols at 1 km, 60 km, 100 km and 200 km fiber distances with negligible optical noise power. The results are supported by EVM measurements, whose accepted percentage to ensure good quality transmissions with QPSK is below 17.5% for NR as stated in [14].



**Figure 3.** CFO effect at different fiber distances. (a) BER vs  $E_b/N_0$  curves at 1 km, 20 km, 60 km and 100 km, (b) Constellation diagrams at 1 km, 60 km, 100 km and 200 km.

According to Figure 3(a), the transmissions preserved a similar BER performance for all distances up to  $\sim 7$  dB value, after which the results changed according to each fiber distance. The transmissions at 1 km and 20 km showed similar performance reaching the accepted BER limit at  $\sim 14$  dB, indicating no significant degradations at such a range. To reach the same BER over 60 km, +3 dB were required, whereas the transmission through the 100 km link showed a decreasing response up to  $\sim 25$  dB, from which it tended to stabilize at  $\sim 10^{-8}$  without achieving the accepted BER limit afterwards.

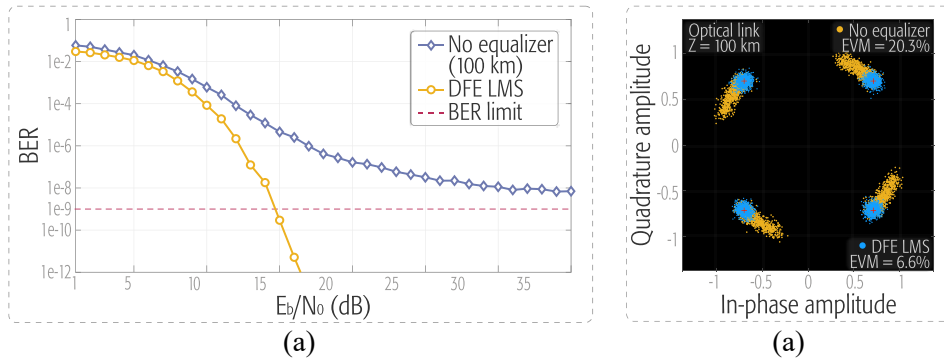
From the constellation diagrams in Figure 3(b), an irregular frequency response in the form of symbol rotation is observed on the transmitted symbols when using long fiber links, as in this case, at 100 km and 200 km. This effect, namely CFO, is generally allocated to a frequency mismatch in the transmitter and receiver oscillators, which breaks the orthogonality among subcarriers leading to ICI in OFDM transmissions, as explained in literature [2]. Therefore, the transmission through 100 km and 200 km resulted in a low EVM performance due to CFO, whereas a slight affectation was obtained at 1 km and 60 km, preserving an EVM well below the accepted limit, hence ensuring an optimal transmission.

### 3.2. Carrier frequency offset compensation

The CFO mitigation was performed in this section by using DFE LMS equalization, which permitted to evaluate the OFDM transmission performance before and after compensation according to  $E_b/N_0$  variation in 3.2.1 and based on different fiber distances later in 3.2.2.

**3.2.1. Compensation based on  $E_b/N_0$  variation.** As it was seen in 3.1, CFO effect was negligible at optical fiber distances between 1 km and 20 km, which corresponds to the standardized range for 5G low latency applications in [15]. Therefore, a more adverse transmission scenario was chosen in this section in which CFO impairments significantly compromised the system performance, allowing the transmission performance to be compared before and after compensation.

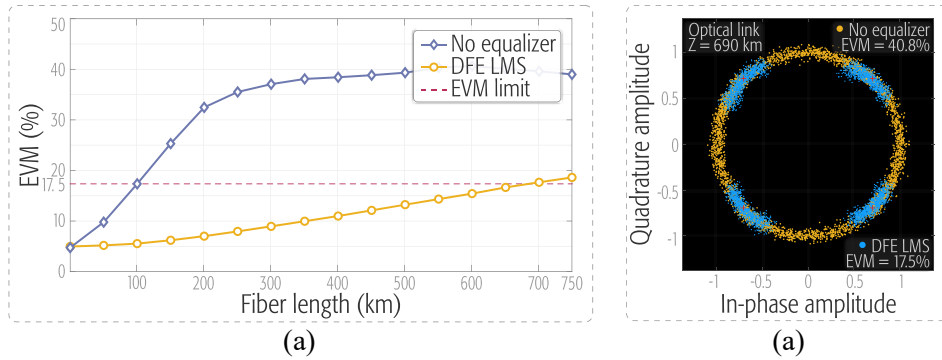
For that purpose, Figure 4(a) presents OFDM transmission results in the form of BER vs  $E_b/N_0$  curves at 100 km of fiber before and after using DFE LMS equalization. Results without using equalization showed a tendency to stabilize around a BER of  $10^{-8}$ ; hence, out of the recommended limit for telecommunications applications. However, a remarkable performance improvement was seen after DFE LMS equalization, making it possible to consolidate the transmission at  $\sim 14.5$  dB ensuring acceptable BER values.



**Figure 4.** Carrier frequency offset compensation with and without equalization through a 100 km fiber. (a) BER vs  $E_b/N_0$  curves, (b) Constellation diagram.

The penalties in the data transmissions through different fiber distances were due to CFO. The constellation diagram in Figure 4(b) shows that the CFO effect causing ICI was completely mitigated at the 100 km fiber link after using DFE LMS equalization, allowing the symbols sent to be maintained at the corresponding constellation points. The aforementioned indicates positive results in the transmission and an EVM performance improvement of 13.7%.

**3.2.2. Compensation based on different fiber distances.** Equalization methods are likely to fluctuate in terms of performance when mitigating transmission impairments at different fiber distances; for this reason, Figure 5(a) presents results in the form of curves of EVM vs fiber distance to evaluate the DFE LMS equalizer performance, and determine to what extent it was possible to expand the optical link range in the OFDM transmission after the CFO compensation.



**Figure 5.** Maximum optical range extension after carrier frequency offset compensation. (a) EVM vs Fiber length, (b) Constellation diagram at 690 km.

The information in Figure 5(a) shows that very positive results were obtained, allowing the achievable optical limit to be extended from  $\sim 100$  km without equalization up to  $\sim 690$  km after DFE LMS equalization, ensuring EVM values below the recommended limit (17.5%).

To expand the previous information, the resulting constellation diagram at the maximum fiber distance previously mentioned is presented in Figure 5(b) before and after using the DFE LMS equalizer. The most significant degradations were due to CFO, whose distortion factor has been distance dependent so far. The CFO was largely mitigated after the equalization generating a diagram in which the QPSK constellation points stood clearly distinguishable while achieving a percentage of EVM just at the accepted limit. It should be noted that when appropriate equalization methods are used, the rotation effect observed in Figure 3(b), normally tends to be evenly distributed throughout the constellation points, as shown in Figure 5(b), which in turn positively affects the EVM performance; therefore, the transmission quality.

#### 4. Conclusions

In this paper, a decision-feedback equalizer based on the least mean square algorithm was used to compensate for the frequency disparity in the transmitter and receiver local oscillators, which was witnessed as carrier frequency offset in Radio-over-Fiber transmissions when considering the 5G NR standard. Therefore, system performance was compared with and without the aforementioned equalization technique to measure the CFO impact on the OFDM transmissions.

As seen in results from section 3.1, the CFO effect was not significant over the standardized optical range for 5G low latency applications set at  $(0, 20 \text{ km}]$ , indicating the validity of the transmission approach simulated. Moreover, the overall simulations showed that the CFO was the most significant degradation affecting the OFDM transmission. Such an effect severely degraded the quality of communication, breaking the orthogonality among OFDM subcarriers and leading to ICI. Simulations also displayed that such an effect increases as fiber distance is longer, compromising the transmission after  $\sim 60$  km as shown in Figure 3(a). From results in 3.2.1, DFE LMS equalization provided a remarkable improvement in the communication, achieving BER measurements below  $10^{-9}$  at  $\sim 14.5$  dB through a 100 km fiber link. As a consequence, symbols were maintained at the corresponding constellation points due to an optimal CFO cancellation. Despite most equalization techniques being likely to fluctuate in terms of performance when facing different optical distances, the proposed equalizer exhibited a very uniform response throughout the whole range examined. The latter allowed the achievable optical limit to be extended from  $\sim 100$  km with no equalizer up to  $\sim 690$  km after equalization without interruptions.

By using DFE LMS equalization, the frequency mismatch in the transmitter and receiver oscillators seen as CFO was correctly compensated, ensuring correct communications according to BER and EVM measurements. Therefore, it is concluded that the proposed adaptive equalization technique is a promising contender to mitigate CFO and enhance 5G-based Radio-over-Fiber data transmissions.

## References

- [1] Alavi S E *et al.* 2016 *Scientific Reports* **6(19891)** 1
- [2] Moon S R *et al.* 2017 *Optical Fiber Technology* **36** 181
- [3] Zaidi A A *et al.* 2016 *IEEE Communications Magazine* **54(11)** 90
- [4] Ali F *et al.* 2019 *Electronics* **8(11)** 1
- [5] Kang Z *et al.* 2011 *7th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing* 1
- [6] Asplund H *et al.* 2020 *Advanced Antenna Systems for 5G Network Deployments* (London: Elsevier Ltd.)
- [7] Thomas V A, El-Hajjar M, Hanzo L 2015 *IEEE Communications Surveys & Tutorials* **18(1)** 29
- [8] MathWorks 2020 *Communications Toolbox User's Guide* (Natick: The MathWorks, Inc.)
- [9] Turitsyn S K *et al.* 2017 *Optica* **4(3)** 307
- [10] International Telecommunication Union (ITU) 2016 *Characteristics of a single-mode optical fibre and cable, G.652* (United Nations: International Telecommunication Union)
- [11] Haykin S 2014 *Adaptive Filter Theory* (United States of America: Pearson Education Limited)
- [12] Farhang-Boroujeny B 2013 *Adaptive Filters: Theory and Applications* (United Kingdom: John Wiley & Sons, Ltd.)
- [13] Walsh D *et al.* 2005 *Ninth International Topical Meeting on Education and Training in Optics and Photonics* **9664** 1
- [14] 3rd Generation Partnership Project (3GPP) 2020 *NR; Physical channels and modulation, TS 38.211* (France: 3rd Generation Partnership Project)
- [15] International Telecommunication Union (ITU) 2019 *5G wireless fronthaul requirements in a passive optical network context, G.Sup66* (United Nations: International Telecommunication Union)

## Anexo 2. Paper 2: Análisis de los efectos dispersivos en un escenario de Radio-sobre-Fibra con características de la red 5G

**D. Hidalgo-Monsalve**, B. Medina-Delgado, D. Guevara-Ibarra, F. Amaya-Fernández, and J. Álvarez-Guerrero, “Análisis de los efectos dispersivos en un escenario de Radio-sobre-Fibra con características de la red 5G,” Sometido a revisión en la revista *Ingenius, Revista de Ciencia y Tecnología* de la Universidad Politécnica Salesiana, Septiembre 2020.

# ANÁLISIS DE LOS EFECTOS DISPERSIVOS EN UN ESCENARIO DE RADIO-SOBRE-FIBRA CON CARACTERÍSTICAS DE LA RED 5G

## ANALYSIS OF DISPERSIVE EFFECTS IN A RADIO-OVER-FIBER SCENARIO WITH 5G NETWORK CHARACTERISTICS

Dúmar Hidalgo-Monsalve<sup>1,\*</sup>, Byron Medina-Delgado<sup>1</sup>, Dinael Guevara-Ibarra<sup>1</sup>, Ferney Amaya-Fernández<sup>2</sup>, Jesús Álvarez-Guerrero<sup>3</sup>

### Resumen

Radio-sobre-Fibra (RoF) es una solución prometedora para soportar el desarrollo de la quinta generación de comunicaciones 5G, la cual está pensada para satisfacer la creciente demanda de información actual. Con RoF es posible extender la cobertura de las redes de acceso 5G aprovechando la alta capacidad del medio óptico y la facilidad de acceso que brinda el canal inalámbrico. Sin embargo, estos son afectados por las degradaciones inherentes al canal híbrido mencionado, generando degradaciones en la comunicación que se traducen en obtención de información errónea por parte de los usuarios finales. Debido a lo anterior, en este trabajo de investigación se lleva a cabo la transmisión de señales OFDM basadas en el estándar 5G New Radio (NR) con el fin de analizar qué tanto los impedimentos óptico-inalámbricos afectan la comunicación en un escenario de transmisión de Radio-sobre-Fibra. Por medio de simulaciones en MATLAB, se demostró que es posible realizar transmisiones OFDM bajo los lineamientos de NR asegurando bajas tasas de error de bits en el rango de 0 a 20 km de fibra óptica designado para aplicaciones 5G NR de baja latencia.

**Palabras Clave:** 5G Nuevo Radio, Efectos dispersivos, Radio-sobre-Fibra, OFDM, Topología fibra-inalámbrica, Transmisión de datos

### Abstract

Radio-over-Fiber (RoF) is a promising solution to support the development of the fifth generation of communications 5G, which is aimed to meet the current, growing demand for information. RoF makes it possible to extend the coverage of 5G access networks by exploiting the high capacity of the optical medium and the ease of access provided by the wireless channel. However, RoF systems are affected by inherent degradations due to the aforementioned hybrid channel, thus generating communication penalties that result in errors in the information sent to end users. Therefore, a 5G-based OFDM signal transmission is performed in this research work in order to analyze to what extent the optical-wireless impairments affect the communication in a Radio-over-Fiber transmission scenario. MATLAB simulations allowed it to be demonstrated that it is possible to carry out OFDM transmissions under NR guidelines ensuring low bit error rates in the 0 to 20 km fiber link range allocated for low-latency 5G NR applications.

**Keywords:** 5G New Radio, Data transmission, Dispersive effects, Fiber-Wireless topology, Radio-over-Fiber, OFD

---

<sup>1,\*</sup>Grupo de investigación GIDET, Universidad Francisco de Paula Santander, Colombia.  
ORCID: 0000-0001-8308-9714, 0000-0003-0754-8629, 0000-0003-3007-8354

<sup>2</sup>Grupo de investigación GIDATIC, Universidad Pontificia Bolivariana, Colombia.  
ORCID: 0000-0001-7215-0196

<sup>3</sup>Grupo de investigación GICSD, Universidad Libre, Colombia.  
ORCID: 0000-0001-8226-3258

Autor para correspondencia: [dumarhmhim@ufps.edu.co](mailto:dumarhmhim@ufps.edu.co)

## 1. Introducción

Actualmente, el porcentaje de población que emplea medios digitales como principal fuente de información aumenta cada día. Aplicaciones de uso masivo tales como la transmisión de video, la realidad aumentada y los servicios de almacenamiento en la nube son cada vez más demandados, lo cual representa un reto directo para las compañías prestadoras de servicios de telecomunicaciones [1].

La quinta generación de infraestructuras de comunicaciones 5G nace como consecuencia del actual perfil de consumo de información. 5G brinda un panorama en el que todo estará digitalizado, medido y automatizado, impulsando así un nuevo modelo de conectividad global que requiere altas velocidades de transmisión, cobertura total, latencias muy bajas y un amplio ancho de banda para funcionar [2].

5G New Radio (NR) es el punto de partida en la estandarización global de las redes 5G propuesto por el 3GPP (3rd Generation Partnership Project) en 2016. En respuesta a dicho estándar, en los últimos años diversas arquitecturas de red enfocadas en soportar la interfaz de radio 5G han sido estudiadas. Entre estas, la arquitectura cableada FTTH (Fiber-to-the-Home), la cual ha sido desplegada en varias partes del mundo basándose en una topología de punto a punto (P2P) que permite llegar al usuario directamente por medio de enlaces de fibra óptica ofreciendo a estos un gran ancho de banda. No obstante, la conectividad inalámbrica es generalmente preferida por los usuarios actuales debido a su significativa flexibilidad a pesar de su aún limitada cobertura [1], [2].

Sin embargo, Radio-sobre-Fibra (RoF, *Radio-over-Fiber*) es una de las propuestas de arquitectura de red más prometedoras para ampliar la cobertura de radio y soportar los altos requerimientos de 5G NR [3]. Por medio de esta se aprovechan las prestaciones tanto del medio óptico (baja atenuación, gran ancho de banda, entre otros), como del inalámbrico (movilidad, cobertura, entre otros), brindando además ventajas al sistema en cuanto a centralización de equipos, menor complejidad,

flexibilidad operacional e inmunidad a interferencia electromagnética [4].

Además de arquitecturas de red, se han evaluado técnicas de modulación apropiadas para NR. La Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal (OFDM, *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) ha ganado protagonismo en los últimos años por su uso en múltiples tecnologías como WiFi y WiMax. OFDM fue adoptado por el 3GPP como principal candidato a forma de onda para NR en [5]. Con OFDM y el espectro de radiofrecuencias (RF) se pretende ofrecer altas tasas de transmisión y brindar hasta 100 veces más capacidad que la ofrecida en LTE [5]–[9].

A pesar de que RoF en conjunto con las señales OFDM y el espectro de radio frecuencias ofrecen grandes ventajas, existen retos por superar que limitan su desempeño.

En el canal óptico existen los efectos de propagación de la fibra de donde destaca la dispersión cromática (CD, *Chromatic Dispersion*). Esta afecta los sistemas ópticos ocasionando ensanchamiento en el tiempo de los pulsos que viajan a lo largo del canal, provocando que las componentes espectrales de estos lleguen a destiempo. El canal inalámbrico, por otro lado, exhibe altas tasas de error de bits y aporta degradaciones importantes en la información por parte de efectos como la dispersión por multitrayectoria o el *shadowing* [10], [11].

Las aportaciones de ambos canales en conjunto generan degradaciones indeseadas en las transmisiones OFDM que se ven reflejadas como Interferencia Interportadora (ICI, *Inter-carrier Interference*), dando como resultado obtención de información inexacta por parte del usuario [12].

En investigaciones relacionadas como la realizada en [2], se presenta un método fotónico simple para la generación de señales milimétricas, usadas para transmitir señales OFDM en sistemas de Radio-sobre-Fibra para su aplicación en redes de acceso 5G. A su vez, en [13] se demuestra que OFDM es una opción formidable para cubrir los requisitos de 5G NR de acuerdo con indicadores clave como flexibilidad, eficiencia espectral y compatibilidad con MIMO (Multiple-Input Multiple-Output), entre otros.



Por lo tanto, en este artículo se presentan resultados de simulaciones en MATLAB de la transmisión de una señal OFDM a través de un canal óptico-inalámbrico con el fin de analizar cómo los efectos de propagación inherentes a este, limitan el desempeño de un sistema RoF con características 5G. Los resultados obtenidos permiten demostrar que es posible llevar a cabo la transmisión de señales OFDM en el rango óptico comprendido entre 0 y 20 km, el cual se haya estandarizado para aplicaciones 5G de baja latencia en [14].

Con el fin estructurar adecuadamente este artículo, en el subtítulo 1.1 se describe brevemente el principio de funcionamiento de los sistemas RoF, en el título 2 se explican las etapas del escenario simulado, en el título 3 se presentan y discuten los resultados obtenidos y en el título 4 se destacan las conclusiones más relevantes de acuerdo con la obtención de los resultados.

### 1.1. Sistemas de Radio-sobre-Fibra

RoF es una solución prometedora para extender la cobertura del acceso inalámbrico haciendo uso de la fibra óptica. RoF es también considerada una de las propuestas más prometedoras para el despliegue de soluciones de red de alta capacidad que soporten gran cantidad de servicios inalámbricos tanto de 4G como de 5G en conjunto [3].

Los sistemas RoF son generalmente implementados de acuerdo con una topología de fibra-inalámbrica (FiWi, *Fiber-Wireless*), como se ilustra en la Figura 1. En la conexión de bajada (DL, *Downlink*), la información en forma de señales RF es transportada por el canal óptico desde una Oficina Central (CO, *Control Station*) hasta Estaciones Base (BS, *Base Station*) desplegadas masivamente por el casco urbano, y retransmitida desde estas hasta el usuario a través del medio inalámbrico para brindar facilidad de acceso. En el enlace de subida (UL, *Uplink*), la transmisión se lleva a cabo de forma similar desde las BSs hasta la CO [3].

Para cumplir los requerimientos de la red fronthaul 5G NR, en las recomendaciones ITU-T serie G se establece que los enlaces de fibra entre la CO hasta las BSs no deben sobrepasar los 20 km de distancia para servicios de baja latencia y se recomienda el uso de fibra monomodo estándar

(SMF, *Single-mode Fiber*) debido a su baja atenuación [14].

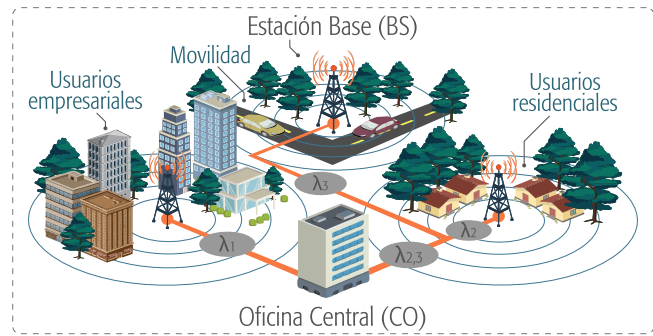


Figura 1. Escenario de aplicación de RoF.

Paralelamente, RoF generalmente combina dos tecnologías clave: La Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales (OFDM), la cual es un caso especial de transmisión mutiportadora que consiste en enviar información dividiendo el ancho de banda total de esta en un número determinado de subportadoras ortogonales [15], y la Modulación de Intensidad con Detección Directa (IM/DD, *Intensity Modulation/Direct Detection*), empleada para transformar las señales OFDM al dominio óptico y transportarlas por la fibra para su posterior transmisión por el canal inalámbrico. Por medio de estas dos tecnologías, se mejora considerablemente la eficiencia espectral y se logran altas tasas de transmisión. Un diagrama básico de transmisión IM/DD OFDM se muestra en la Figura 2.

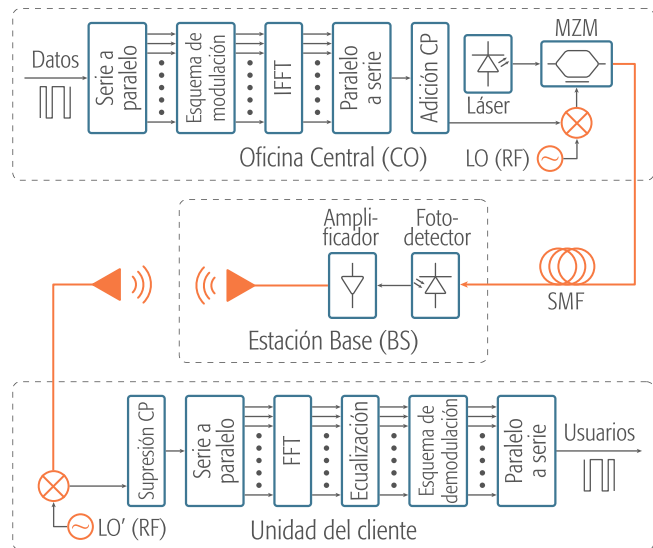


Figura 2. Transmisión IM/DD OFDM

Como se muestra en el diagrama, inicialmente la información en forma de bits es convertida de serie a paralelo y preparada para ser mapeada de acuerdo a un esquema de modulación determinado. Después del proceso de mapeo, un bloque de Transformación Rápida Inversa de Fourier (IFFT, *Inverse Fast Fourier Transform*) es empleado para generar las subportadoras ortogonales OFDM, el cual tiene un tamaño que representa el número de subportadoras totales que contendrá la señal OFDM.

La información es posteriormente serializada para agregar un prefijo cíclico (CP, *Cyclic Prefix*) empleado para evitar Interferencia Interportadora (ICI, *Inter-carrier Interference*), la cual es típica en transmisiones de señales OFDM debido a la alta sensibilidad de estas a errores de sincronización, como se explica en [16]. La señal OFDM es posteriormente modulada en RF por un Oscilador Local (LO, *Local Oscillator*) antes de ser transmitida por el medio óptico.

Al emplear IM/DD, la salida óptica generada por un láser es modulada en intensidad por la señal de información OFDM por medio de un dispositivo de modulación externa Mach Zehnder (MZM). La señal resultante es posteriormente enviada a través del enlace de fibra y finalmente detectada por un fotodetector en la etapa de recepción de la BS.

La señal detectada es finalmente amplificada y retransmitida por la interfaz de aire hasta alcanzar la etapa de recepción de la unidad del cliente, donde se procede a obtener la información aplicando el proceso inverso explicado en la etapa de transmisión OFDM, normalmente incluyendo un bloque adicional de ecualización adaptativa [17], [18].

## 2. Materiales y métodos

Para la simulación del escenario RoF, se tomó como base un modelo de transmisión OFDM IM/DD como el mostrado en la Figura 2 empleando la caja de herramientas de Comunicaciones y Procesamiento de Señales de MATLAB. En la sección 2.1 de este capítulo se explica el proceso de generación de la forma de onda OFDM, en la sección 2.2 se especifican los parámetros seleccionados para el canal óptico y en la sección 2.3 se describe el modelo de canal inalámbrico empleado.

### 2.1. Forma de onda OFDM

Debido a los altos requerimientos de 5G NR, no es posible asignar solo una configuración de onda para satisfacer todo el espectro de aplicaciones posibles. Es por ello que para NR se incluyeron varios formatos de modulación, entre los que se encuentran BPSK y QPSK para la Modulación por Desplazamiento de Fase (PSK, *Phase Shift Keying*) y 16QAM, 64QAM y 256QAM correspondientes a la Modulación de Amplitud en Cuadratura (QAM, *Quadrature Amplitude Modulation*) en [5].

La escogencia del esquema de modulación tiene implicancias importantes en cuanto a la velocidad de bits y el alcance de la transmisión. Un esquema de mayor orden permite el envío de más símbolos simultáneos, pero es más propenso a sufrir por ruido o interferencia durante la transmisión [19].

En este escenario se optó por limitar la velocidad de bits lograble con el fin de garantizar un alcance mayor en las transmisiones de la etapa óptico-inalámbrica. Por esta razón se escogió el esquema de modulación QPSK en lugar de los esquemas QAM de mayor orden aceptados en NR. A su vez, se descartó BPSK debido a que QPSK permite duplicar la tasa de bits posibles mientras se ocupa el mismo ancho de banda ofrecido por BPSK. Los criterios para la selección de esquemas de modulación se abarcan más detalladamente en [17].

Se seleccionó la forma de onda OFDM y señales portadoras RF debido a que estas se encuentran establecidas en el estándar NR en [5] y [6]. Para la generación de formas de onda OFDM existe una gran variedad de numerologías, al igual que un rango de frecuencias operativas más amplio que en LTE con el fin de soportar un número mayor de servicios. Con base en lo anterior, en [13] se relacionan dichas numerologías con varios rangos de frecuencias a fin de llevar a cabo un diseño de forma de onda apropiado, como se muestra en la Tabla 1.

El escenario de simulación se planteó con el fin de analizar las limitaciones de las redes de acceso 5G futuras, las cuales están pensadas para ocupar las bandas de frecuencias más altas. A partir de lo anterior, se escogió una frecuencia de portadora RF de 50 GHz, la cual implica un tamaño de CP de 288 de 0.29  $\mu$ s de duración, un tamaño de bloque IFFT

de 4096 y un espaciado entre subportadoras OFDM de 240 kHz.

Tabla 1. Numerologías para 5G NR

Espaciado entre subportadoras (kHz)	Tamaño del bloque IFFT $N_f$	Duración del CP ( $\mu$ s)	Tamaño del CP $N_{CP}$	Rango de frecuencias (GHz)
15		4.69		$\leq 6$
30		2.35		$\leq 20$
60	4096	1.17	288	$\leq 40$
120		0.57		$> 40$
240		0.29		$> 40$

## 2.2. Canal óptico

El canal óptico fue modelado mediante el modelo de propagación óptico mostrado en la Ecuación (1), el cual gobierna el comportamiento de los pulsos ópticos dentro de una fibra SMF, donde  $A$  representa la amplitud de la envolvente óptica,  $z$  es la longitud de la fibra y  $t$  es el tiempo [20].

$$j \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} - \frac{\beta_3}{6} \frac{\partial^3 A}{\partial t^3} = - \frac{\partial A}{\partial z} \quad (1)$$

Para el modelo empleado en las simulaciones, solo se tuvo en cuenta la CD a causa de los parámetros de dispersión de segundo orden  $\beta_2$  y la dispersión de tercer orden  $\beta_3$ , los cuales fueron obtenidos a partir de los valores de  $\lambda$  y  $D$  establecidos en la recomendación ITU-T G.652 sobre las características de los canales de fibra SMF [21]. Los valores correspondientes a dichos parámetros se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Valores de las constantes del canal óptico

Constante	Valor
Longitud de onda de operación	$\lambda = 1550$ nm
Parámetro de dispersión	$D = 17$ ps·(nm·km) <sup>-1</sup>
Dispersión segundo orden	$\beta_2 = -21.682$ (ps) <sup>2</sup> ·km <sup>-1</sup>
Dispersión tercer orden	$\beta_3 = 0.117$ (ps) <sup>3</sup> ·km <sup>-1</sup>

Al emplear el modelo óptico mencionado, se pudo omitir el uso de los dispositivos ópticos ilustrados en la Figura 2, lo cual permitió liberar la transmisión de las componentes de ruido agregadas por dichos dispositivos y así poder enfocar los resultados hacia el análisis de las degradaciones aportadas solo por el canal de comunicaciones.

## 2.3. Canal inalámbrico

La obtención de los resultados fue enfocada principalmente en las degradaciones aportadas por el canal óptico, por lo tanto, el canal de tipo

inalámbrico fue modelado de forma básica. A partir de lo anterior, el medio inalámbrico se modeló como una función de distribución gaussiana, como se expresa en la Ecuación (2), donde  $\mu$  es la media, la cual tiene un valor de 0 en aplicaciones de telecomunicaciones, y  $\sigma^2$  representa la varianza que toma valores diferentes dependiendo de la relación señal a ruido (SNR).

$$P(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (2)$$

Por medio de este modelo, se varió la potencia de ruido del canal para alterar la información y poder evaluar hasta qué punto sería posible lograr una buena transmisión para diferentes escenarios. Para esto se calculó el valor de la SNR para la señal OFDM, de acuerdo con la Ecuación (3)

$$\text{SNR} = \frac{E_b}{N_0} + 10 \log_{10} k + 10 \log_{10} \frac{N_d}{N_f} \quad (3)$$

En esta se tuvo en cuenta el número de bits por símbolo  $k = 2$  para QPSK, el número de subportadoras total  $N_f$  y útiles  $N_d = N_f - N_{CP}$ , así como el factor  $E_b/N_0$  (Relación entre la energía por bit y la densidad espectral de potencia de ruido) que tomó valores entre 0 y 30 dB para las simulaciones que implicaban la variación de la SNR.

Para la adición de ruido, se calculó la potencia  $P$  de la señal OFDM, nombrada  $X$ , por medio de  $P = |X|^2$  para posteriormente calcular la varianza  $\sigma^2 = P/10^{\text{SNR}/10}$ . Una vez calculada la varianza, se generó una señal de ruido  $Z$  usando la función *randn* de MATLAB, la cual retorna una matriz de números aleatorios normalmente distribuidos dependiendo de la longitud de la señal  $X$ . De esta forma se obtuvo la señal de salida alterada  $Y = X + Z$  en función de la variación de  $E_b/N_0$ .

## 3. Resultados y Discusión

Los resultados fueron enfocados a mostrar cómo la transmisión de una señal OFDM es afectada por el canal óptico-inalámbrico en un escenario RoF. En la sección 3.1 se llevó a cabo el análisis de las degradaciones debidas al canal óptico, mientras que en la sección 3.2 se adicionan las perturbaciones ocasionadas por el canal inalámbrico. Se emplearon

herramientas de análisis cualitativo como diagramas de constelación y ojo, y de tipo cuantitativo como EVM (Error Vector Magnitude) y BER (Bit Error Rate) para cualificar y medir el canal híbrido mencionado.

### 3.1. Perturbaciones debidas al canal óptico

Con el fin de evaluar las degradaciones en la transmisión debidas al canal de fibra óptica, en la Figura 3 se presentan diagramas de constelación de la transmisión de una señal OFDM a lo largo de distancias de fibra de 1, 20, 60 y 100 km. Las gráficas obtenidas fueron soportadas con mediciones de EVM para cada escenario.

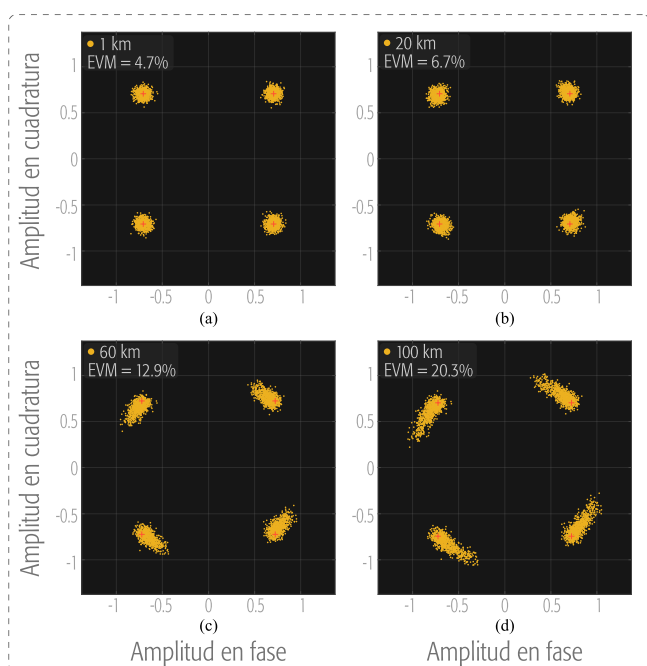


Figura 3. Diagramas de constelación para el análisis cualitativo del canal óptico.

En los diagramas de constelación de la figura, se puede apreciar una respuesta en frecuencia irregular en forma de ruido gaussiano común a todos los diagramas de constelación. Este ruido es debido a irregularidades durante el proceso de recepción RF, el cual es evidenciado y explicado en la literatura [22]. Además, se evidencia Desplazamiento de Frecuencia de Portadora (CFO, *Carrier Frequency Offset*) que se aprecia como rotación de los símbolos transmitidos en el plano. El CFO se hizo más evidente usando distancias de fibra de 60 y 100 km, así como se muestra en la Figura

3c-d. Dicho efecto conlleva a que se pierdan componentes espectrales en el borde del espectro en frecuencia de la señal de información y se debe a un desfase de frecuencia entre la señal óptica recibida y el oscilador local (LO), lo cual provoca Interferencia Interportadora (ICI, *Inter-carrier Interference*) en las transmisiones OFDM, ocasionando un bajo rendimiento de BER y EVM [23], [24].

A partir de estos resultados, se puede evidenciar que el efecto de distorsión predominante en las transmisiones simuladas para distancias de fibra superiores fue el CFO, mientras que no hubo presencia de dispersión de símbolos alrededor de los puntos de constelación al aumentar la distancia de la fibra, cuyo efecto es característico de la Dispersión Cromática (CD). El comportamiento anterior es atribuido en diversas literaturas, entre ellas en [17], a la alta inmunidad de la técnica OFDM frente a la Dispersión Cromática como consecuencia de la ortogonalidad entre subportadoras.

Adicionalmente, se muestran valores de EVM, los cuales representan alteraciones de amplitud y fase en los símbolos enviados, cuyo porcentaje máximo aceptado para garantizar transmisiones de buena calidad con QPSK para NR está fijado en 17.5% en [6]. Así, la transmisión a través de 100 km de fibra resultó en un bajo desempeño de EVM, mientras que para 1, 20 y 60 km se evidenció una afectación creciente a medida que aumentaba la distancia, aun así, manteniendo valores debajo del límite aceptado, garantizándose una transmisión óptima.

En la Figura 4, se puede observar mediante diagramas de ojo la degradación de la información debida a la fibra en el dominio del tiempo. Así como en los diagramas de constelación, la deformación para las distancias de 1 y 20 km es despreciable debido a que la cantidad de distorsión y la abertura del ojo permanecieron casi indistinguibles para ambos casos. Dicho efecto aumentó a los 60 km donde se observa una ligera disminución en la altura del ojo debido a la distorsión aportada por el canal, mientras que la transmisión a 100 km muestra un nivel de distorsión aún leve, pero suficiente para arrojar un mal desempeño de EVM, indicando que el CFO tiene una incidencia negativa importante en

la información enviada, aunque poco significativa cuando se analiza mediante diagramas de ojo.

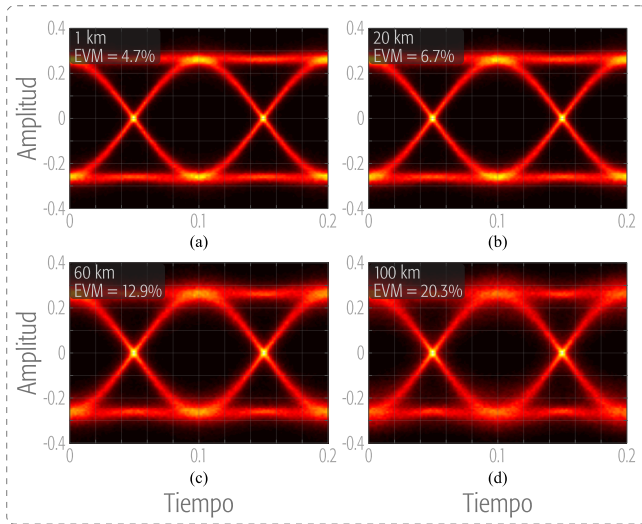


Figura 4. Diagramas de ojo para el análisis cualitativo del canal óptico.

### 3.2. Perturbaciones debidas al canal óptico-inalámbrico

En esta sección se presentó el impacto del canal óptico-inalámbrico en la transmisión usando las distancias de fibra empleadas en la sección 3.1 ante la variación de  $E_b/N_0$  entre 1 y 30 dB.

Así, para evaluar el valor máximo de  $E_b/N_0$  que garantiza una transmisión óptima para distintos tramos de fibra óptica, se realizó un análisis cuantitativo de los efectos del canal óptico-inalámbrico de acuerdo con las variaciones de la potencia de ruido. En la Figura 5 se muestran curvas BER vs  $E_b/N_0$  obtenidas para distancias de 1, 20, 60 y 100 km de fibra.

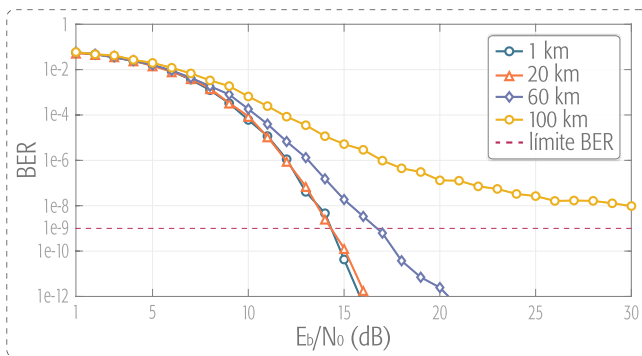


Figura 5. Curvas de BER vs  $E_b/N_0$  [dB] para el análisis cuantitativo.

De acuerdo con [25], el mínimo BER permitido para garantizar una transmisión correcta en telecomunicaciones, ronda el orden de  $10^{-9}$ . Las transmisiones para todas las distancias mantuvieron valores de BER similares hasta  $\sim 7$  dB. Por un lado, las transmisiones a 1 y 20 km exhibieron un desempeño similar alcanzando el mínimo BER permitido a  $\sim 14$  dB, lo cual indica que las degradaciones aportadas por el canal en un rango de 20 km no son significativas. Para lograr el mismo propósito a lo largo de 60 km, se requirió de +3 dB que en los escenarios anteriores. Por el contrario, la transmisión a través del enlace de 100 km mostró una respuesta descendente hasta un valor de  $\sim 25$  dB, a partir del cual presentó una tendencia a estabilizarse a un BER de  $\sim 10^{-8}$  sin antes llegar al límite aceptado.

Con el fin de analizar cualitativamente los efectos del canal óptico-inalámbrico, en la Figura 6 se presentan diagramas de constelación para mostrar el límite máximo de  $E_b/N_0$  que garantiza una transmisión correcta de la señal OFDM. La distancia de fibra empleada fue de 20 km para evaluar el escenario de aplicación de servicios de baja latencia para NR mencionado en la sección 1.1.

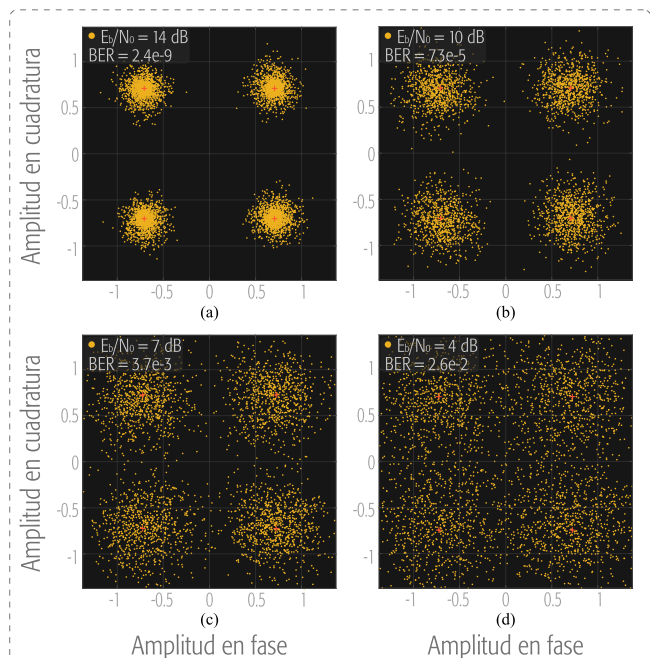


Figura 6. Diagramas de constelación para el análisis del canal óptico-inalámbrico.

Los diagramas de constelación permiten visualizar que el desempeño de la transmisión mejora a medida que el valor de  $E_b/N_0$  aumenta, lo cual es soportado de forma cuantitativa por las medidas de BER. Así, para  $E_b/N_0 = 4, 7$  y  $10$  dB, los símbolos sufrieron degradaciones muy abruptas arrojando un valor de BER alto imposibilitando la transmisión, a menos de incluir alternativas de equalización en la etapa de recepción para recuperar la información enviada. En la Figura 6(a) se soportan de forma cualitativa los resultados de la Figura 5 para  $20$  km, y se aprecia que evidentemente la transmisión es correcta para valores de  $E_b/N_0$  mayores que  $\sim 14$  dB, pues se logran valores de BER cercanos a  $10^{-9}$  y los símbolos permanecen cercanos a los puntos de constelación.

De acuerdo con los diagramas de ojo de la Figura 7, cuando  $E_b/N_0$  toma valores de  $4$  y  $7$  dB, la calidad del ojo presenta niveles de distorsión muy altos que reflejan obtención de información errónea tras la transmisión. Para  $E_b/N_0 = 10$  dB, la abertura del ojo es más clara pero todavía existe distorsión suficiente para descartar un posible escenario de transmisión. En la Figura 7(a), sin embargo, se muestra que es posible transmitir la señal OFDM para  $20$  km de fibra para valores de  $E_b/N_0$  mayores que  $14$  dB, ya que se obtienen valores de BER cerca de los límites recomendados a pesar de que existe clara distorsión en el cruce por cero y la abertura del ojo no es totalmente clara.

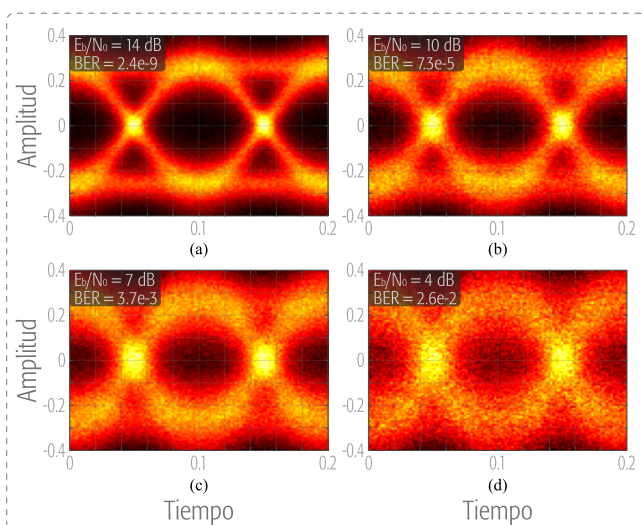


Figura 7. Diagramas de ojo para el análisis del canal óptico-inalámbrico.

## 4. Conclusiones

Se simuló un escenario de RoF en el que se evaluaron las degradaciones de un canal óptico-inalámbrico sobre la transmisión de una señal OFDM diseñada con base en las numerologías y rangos de frecuencias establecidos en el estándar 5G NR [5], [6].

Durante la ejecución de las transmisiones OFDM, se demostró que la degradación más importante obtenida tras la transmisión por el medio óptico fue el Desplazamiento de Frecuencia de Portadora (CFO), mientras que la Dispersión Cromática no tuvo incidencia significativa en el desempeño del sistema debido a la característica principal de ortogonalidad de la forma de onda OFDM, la cual le atribuye una alta inmunidad frente a dicho efecto.

Así, el CFO mostrado en la sección 3.1 como rotación de símbolos en la constelación, alteró el desempeño de la Magnitud del Error Vectorial (EVM). Se demostró entonces que las transmisiones a  $1, 20$  y  $60$  km pueden ser llevadas a cabo para NR ofreciendo valores de EVM aceptables, mientras que el CFO tuvo un impacto negativo importante en el desempeño de EVM a  $100$  km, arrojando medidas fuera del límite estandarizado fijado en  $17.5\%$ . En este último escenario, la ortogonalidad entre subportadoras fue alterada significativamente, conllevando a un nivel de ICI suficiente para imposibilitar la transmisión.

Con base en la sección 3.2, donde se incluyeron las degradaciones aportadas por el canal inalámbrico, se demostró que las transmisiones en el rango entre  $0$  y  $20$  km sugerido para servicios de baja latencia para NR, presentaron un desempeño casi invariable y arrojaron valores óptimos en el desempeño de BER. Se determinó también que la transmisión de señales OFDM para distancias de fibra entre dicho rango pueden ser llevadas a cabo de forma exitosa siempre y cuando el parámetro  $E_b/N_0$  tome valores superiores a  $14$  dB. Por el contrario, se determinó que las simulaciones a  $100$  km de fibra no brindan escenarios de transmisión viables para el tipo de señal que se construyó, ya que no se obtuvieron resultados de BER debajo del

límite aceptado de  $10^{-9}$ , necesario para garantizar fidelidad en la calidad de la información enviada.

Para suprimir el efecto del CFO evidenciado en las simulaciones y así ampliar el alcance de las transmisiones, se propone como trabajo futuro la inclusión de bloques de ecualización en la etapa de recepción de la señal OFDM. Una alternativa adicional es la inserción de componentes de sincronización y estimación del canal empleando subportadoras piloto usadas en la transmisión OFDM para ayudar a mitigar dicho efecto. Se sugiere también mejorar el enfoque del canal inalámbrico adicionando modelos de canal de dispersión Rayleigh o Rician de respuesta selectiva o plana con base en estándares recomendados por la ITU-T. Adicionalmente, se plantea la posibilidad de aumentar el rendimiento del sistema por medio de la adición de más antenas en la transmisión OFDM o del aumento en el orden del esquema de modulación.

## Referencias

- [1] E. Wong, “Next-Generation Broadband Access Networks and Technologies”, *Journal of Lightwave Technology*, vol. 30, no. 4, pp. 597–608, 2012. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/JLT.2011.2177960>.
- [2] S. E. Alavi, M. R. K. Soltanian, I. S. Amiri, M. Khalily, A. S. M. Supa’at, and H. Ahmad, “Towards 5G: A Photonic Based Millimeter Wave Signal Generation for Applying in 5G Access Fronthaul”, *Scientific Reports*, vol. 6, no. 19891, pp. 1–11, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1038/srep19891>.
- [3] Z. Ghassemlooy, W. Popoola, and S. Rajbhandari, *Optical Wireless Communications: System and Channel Modelling with MATLAB®*, 2da ed., Taylor & Francis Group, LLC, Ed., 2018
- [4] M.-O. R. Oswaldo, C.-M. M. Arturo, P.-L. G. Adolfo, and S.-F. C. Arturo, “Generación de señales para sistemas radio sobre fibra basados en combinación óptica”, *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, vol. 16, no. 4, pp. 585–598, 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.riit.2015.09.010>.
- [5] 3rd Generation Partnership Project (3GPP), “NR; Physical channels and modulation”, 3rd Generation Partnership Project, France, TS 38.211, 2020.
- [6] 3rd Generation Partnership Project (3GPP), “NR; Base Station (BS) Radio Transmission and Reception”, 3rd Generation Partnership Project, France, TS 38.104, 2020.
- [7] S. Y. Lien, S. L. Shieh, Y. Huang, B. Su, Y. L. Hsu, and H. Y. Wei, “5G New Radio: Waveform, Frame Structure, Multiple Access, and Initial Access”, *IEEE Communications Magazine*, vol. 55, no. 6, pp. 64–71, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/MCOM.2017.1601107>.
- [8] R. Chakraborty, N. Kumari, M. Mousam, and A. Mukherjee, “The Future of 5G and Millimeter Waves”, *2018 Second International Conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA)*, pp. 1679–1683, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ICECA.2018.8474584>.
- [9] J. Proakis and M. Salehi, *Digital Communications*, 5ta ed., McGraw-Hill Companies, Inc., Ed., 2008
- [10] H.-C. Yang, *Introduction to Digital Wireless Communications*, 1ra ed., The Institution of Engineering and Technology, Ed., 2018
- [11] G. P. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics*, 5ta ed., Elsevier Inc., Ed., 2013
- [12] S. Chen and C. Zhu, “ICI and ISI analysis and mitigation for OFDM systems with insufficient Cyclic Prefix in time-varying channels”, *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 50, no. 1, pp. 78–83, 2004. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TCE.2004.1355879>.
- [13] A. A. Zaidi, R. Baldemair, H. Tullberg, H. Björkegren, L. Sundström, J. Medbo, C. Kilinc, and I. Da Silva, “Waveform and Numerology to Support 5G Services and Requirements”, *IEEE Communications Magazine*, vol. 54, no. 11, pp. 90–98, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/MCOM.2016.1600336> CM.
- [14] International Telecommunication Union (ITU), “5G wireless fronthaul requirements in a

- passive optical network context”, International Telecommunication Union, United Nations, G.Sup66, 2019.
- [15] K. Pahlavan and A. Levesque, *Wireless Information Networks*, 2da ed., John Wiley & Sons, Inc., Ed., 2005
- [16] S. Mohseni, “Study the Carrier Frequency Offset (CFO) for Wireless OFDM,” University of Denver, Colorado, USA, 2013.
- [17] H. Asplund *et al.*, *Advanced Antenna Systems for 5G Network Deployments*, Elsevier Ltd., Ed., 2020
- [18] V. A. Thomas, M. El-Hajjar, and L. Hanzo, “Millimeter-Wave Radio over Fiber Optical Upconversion Techniques Relying on Link Non-Linearity”, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 18, no. 1, pp. 29–53, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/COMST.2015.2409154>.
- [19] T. Chapman, E. Larsson, P. von Wrycza, E. Dahlman, S. Parkvall, and J. Sköld, *HSPA evolution: The fundamentals for mobile broadband*, Elsevier Ltd., Ed., 2015
- [20] S. K. Turitsyn, J. E. Prilepsky, S. T. Le, S. Wahls, L. L. Frumin, M. Kamalian, and S. A. Derevyanko, “Nonlinear Fourier transform for optical data processing and transmission: advances and perspectives”, *Optica*, vol. 4, no. 3, pp. 307–322, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1364/OPTICA.4.000307>.
- [21] International Telecommunication Union (ITU-T), “Characteristics of a single-mode optical fibre and cables”, International Telecommunication Union, United Nations, ITU-T G.652, 2016.
- [22] P. T. Shih, C. T. Lin, W. J. Jiang, Y. H. Chen, J. J. Chen, and S. Chi, “Full duplex 60-GHz RoF link employing tandem single sideband modulation scheme and high spectral efficiency modulation format”, *Optics Express*, vol. 17, no. 22, pp. 19501–19508, 2009. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1364/oe.17.019501>.
- [23] S. R. Moon, I.-K. Hwang, H.-S. Kang, S.-H. Chang, S.-W. Lee, and J. K. Lee, “CFO compensation method using optical feedback path for coherent optical OFDM system”, *Optical Fiber Technology*, vol. 36, pp. 181–186, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2017.03.017>.
- [24] M. Renfors, X. Mestre, E. Kofidis, and F. Bader, *Orthogonal Waveforms and Filter Banks for Future Communication Systems*, 1ra ed., Elsevier Ltd., Ed., 2017
- [25] D. Walsh, D. Moodie, I. Mauchline, S. Conner, W. Johnstone, and B. Culshaw, “Practical bit error rate measurements on fibre optic communications links in student teaching laboratories”, *Ninth International Topical Meeting on Education and Training in Optics and Photonics*, vol. 9664, no. 96642I, pp. 1–15, 2005. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1117/12.2207674>.



## Anexo 3. Ponencia 1: Análisis de un escenario de Radio-sobre-Fibra como propuesta para soportar los requerimientos de la red 5G

**D. Hidalgo-Monsalve**, B. Medina-Delgado, F. Amaya-Fernández, and J. Álvarez-Guerrero, “Análisis de un escenario de Radio-sobre-Fibra como propuesta para soportar los requerimientos de la red 5G,” en la *VI International Week of Science, Technology and Innovation* de la Universidad Francisco de Paula Santander, 2019.

## LA UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER CÚCUTA Y SECCIONAL OCAÑA

### CERTIFICA QUE:

*Dúmar Hidalgo Monsalve*  
*Con Documento de Identificación*  
*1116802831*

Participó en el evento **III ENCUENTRO INTERINSTITUCIONAL DE SEMILLEROS DE INVESTIGACIÓN** que se desarrolló en el marco de la **VI SEMANA INTERNACIONAL DE CIENCIA, TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN** durante los días 19 al 25 de noviembre del año 2019 en San José de Cúcuta, Norte de Santander Colombia, con el tema **“ANÁLISIS DE UN ESCENARIO DE RADIO SOBRE FIBRA COMO PROPUESTA PARA SOPORTAR LOS REQUERIMIENTOS DE LA RED 5G”**

*Jhan Piero Rojas S.*

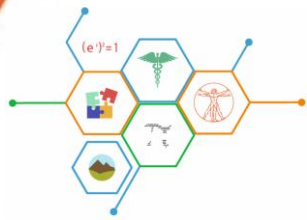
VICERRECTOR ASISTENTE DE INVESTIGACIÓN  
UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER

*Yarocema Velásquez Pérez*

DIRECTOR DE INVESTIGACIÓN Y EXTENSIÓN  
UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER OCAÑA

## Anexo 4. Ponencia 2: Compensación de los efectos dispersivos en un escenario de transmisión de Radio-sobre-Fibra con características de la red 5G

**D. Hidalgo-Monsalve**, B. Medina-Delgado, D. Guevara-Ibarra, F. Amaya-Fernández, and J. Álvarez-Guerrero, “Compensación de los efectos dispersivos en un escenario de transmisión de Radio-sobre-Fibra con características de la red 5G,” en la *VII International Week of Science, Technology and Innovation* de la Universidad Francisco de Paula Santander, 2020.



**7<sup>th</sup> INTERNATIONAL WEEK  
OF SCIENCE, TECHNOLOGY  
AND INNOVATION.**  
2020




## **LA UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER CÚCUTA Y SECCIONAL OCAÑA**

**CERTIFICA QUE:**

**Dúmar Alberto Hidalgo Monsalve**  
C.C. 1116802831

Participó como **PONENTE** en modalidad **ORAL** en el evento **7<sup>th</sup> INTERNATIONAL WEEK OF SCIENCE, TECHNOLOGY AND INNOVATION** que se desarrolló del 06 al 09 de octubre del año 2020 en San José de Cúcuta, Norte de Santander Colombia, con el tema “COMPENSACIÓN DE LOS EFECTOS DISPERSIVOS EN UN ESCENARIO DE TRANSMISIÓN DE RADIO-SOBRE-FIBRA CON CARACTERÍSTICAS DE LA RED 5G”.



*Juan Pardo Rojas*

**VICERRECTOR ASISTENTE DE  
INVESTIGACIÓN  
UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA**

*Yoracama Velásquez Pérez*

**DIRECTOR DE INVESTIGACIÓN Y EXTENSIÓN  
UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA  
SANTANDER OCAÑA**