



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Diseño y construcción de un sistema de radio sobre fibra (ROF) basado en un oscilador optoelectrónico

Elkin Andres Ladino Ordoñez

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería de Sistemas e Industrial

Bogotá D.C., Colombia

2023

Diseño y construcción de un sistema de radio sobre fibra (ROF) basado en un oscilador optoelectrónico

Elkin Andres Ladino Ordoñez

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Ingeniería De Telecomunicaciones

Director(a):

Gloria Margarita Varón Durán, PhD.

Codirector:

Juan Fernando Coronel Rico, PhD.

Línea de Investigación:

Redes y Sistemas de Telecomunicaciones

Grupo de Investigación:

Electrónica de Altas frecuencias y Telecomunicaciones (CMUN)

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería de Sistemas e Industrial

Bogotá D.C., Colombia

2023

A mis padres

Agradecimientos

Quiero aprovechar esta oportunidad para agradecer de corazón a mis padres, cuyo inmenso amor y apoyo han sido el cimiento sólido sobre el cual he construido mi carrera, siempre han sido y serán mi mayor motivación.

A mi directora, la profesora Margarita Varón, por su amabilidad y disposición para compartir el conocimiento, que han enriquecido mi crecimiento académico y personal. No tengo palabras suficientes para expresar lo agradecido que estoy por la oportunidad que me brindó al permitirme formar parte de su equipo de investigación. Sin su tutoría y paciencia, no hubiese podido culminar este trabajo.

A mi codirector, el profesor Juan Fernando Coronel, le debo mi más sincero y profundo agradecimiento por brindarme su confianza y apoyo para dar este importante paso en mi educación.

A mis compañeros del grupo de investigación en Electrónica de Altas Frecuencias y Telecomunicaciones (CMUN), por sus aportes y ayuda en mi trabajo. En especial a Camilo, Oscar, don Jorge, Jhonatan, Nicolas y Andrés, quienes me acompañaron y apoyaron durante las distintas actividades realizadas.

A Mónica y Yury, por su apoyo durante el desarrollo de las pruebas y las ideas de implementación. A William y Alejandro del almacén, por facilitar amablemente el préstamo de algunos de los equipos y espacios necesarios para el desarrollo del proyecto.

A mi estimada Fer, por su apoyo incondicional y su ánimo constante, que fueron fundamentales en momentos de incertidumbre y agotamiento. Gracias por animarme y recordarme que soy capaz de superar cualquier reto.

Resumen

Diseño y construcción de un sistema de radio sobre fibra (ROF) basado en un oscilador optoelectrónico

La creciente demanda de servicios inalámbricos que prometen acceso en cualquier momento y lugar ha generado un agotamiento del espectro electromagnético, lo que plantea la necesidad de mejorar los sistemas de comunicación existentes.

En este trabajo de tesis se propone un sistema de radio sobre fibra basado en el uso de un oscilador optoelectrónico como una posible solución para mejorar el uso del espectro en altas frecuencias y garantizar características de transmisión óptimas. Se presenta la simulación de un prototipo de transmisión punto a punto que utiliza un oscilador optoelectrónico de modulación externa aplicado a un sistema de radio sobre fibra, analizando los resultados del enlace de bajada.

Con esta finalidad, se caracterizó un sistema de radio sobre fibra con la ayuda del radio definido por software en la banda de frecuencia 5,8 GHz. Luego, se desarrolló un oscilador optoelectrónico diseñado para esta misma banda de frecuencia. Finalmente se llevó a cabo una simulación donde se integra el sistema, en donde se contrastaron los resultados obtenidos con las características sugeridas por diferentes estándares y protocolos, para luego evaluar las figuras de mérito del sistema.

Los resultados conseguidos permitieron observar la directa relación entre las figuras de mérito trabajadas y su comportamiento bajo diferentes condiciones y esquemas de modulación, para el sistema de radio sobre fibra. En cuanto al oscilador optoelectrónico se pudieron analizar las condiciones de mejora para el ruido de fase y la estabilidad del oscilador. Finalmente se realiza la integración del sistema de radio sobre fibra con el oscilador optoelectrónico, mediante una simulación, verificando las diferentes figuras de mérito y analizando su rendimiento en distintos escenarios.

Palabras clave: Radio sobre fibra, osciladores, radio definida por software, optoelectrónica.

Abstract

Design and construction of a Radio over Fiber (RoF) system based on an optoelectronic oscillator

The increasing demand for wireless services promising access anytime and anywhere has led to a depletion of the electromagnetic spectrum, prompting the need for improving existing communication systems.

In this thesis work, a Radio-over-Fiber (ROF) system is proposed based on the utilization of an optoelectronic oscillator as a potential solution to enhance spectrum utilization at high frequencies and ensure optimal transmission characteristics. A simulation of a point-to-point transmission prototype is presented, employing an externally modulated optoelectronic oscillator applied to a ROF system, and analyzing the results of the downlink link.

To achieve this objective, a ROF system was characterized using software-defined radio in the 5,8 GHz frequency band. Subsequently, an optoelectronic oscillator designed for this same frequency band was developed. Finally, a simulation was conducted to integrate the system, contrasting the obtained results with characteristics suggested by different standards and protocols, and then evaluating the system's performance metrics.

The achieved results allowed observing a direct relationship between the performance metrics studied and their behavior under different conditions and modulation schemes for the ROF system. Regarding the optoelectronic oscillator, improvements in phase noise and stability conditions were analyzed. Finally, the integration of the radio over fiber system with the optoelectronic oscillator is carried out through a simulation, verifying the different figures of merit, and analyzing its performance in various scenarios.

Keywords: Radio-over-fiber, oscillators, software-defined radio, optoelectronics.

Esta tesis de maestría se sustentó el 7 de noviembre de 2023 a las 9:00 a.m., y fue evaluada por los siguientes jurados:

Javier Enrique Arévalo Peña
Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería

Christian Daniel Muñoz Arcos
National Physical Laboratory - UK

Contenido

	Pág.
Resumen.....	V
Contenido.....	VIII
Lista de figuras.....	X
Lista de tablas.....	XIII
1. Introducción.....	1
1.1 Objetivos	3
1.1.1 Objetivo general	3
1.1.2 Objetivos específicos	3
2. Marco teórico y estado del arte	4
2.1 Sistemas de Radio sobre Fibra	4
2.1.1 Arquitecturas de trabajo en ROF	5
2.2 Oscilador optoelectrónico	7
2.2.1 Ruido de fase	9
2.2.2 Ruido asociado a los componentes del oscilador	10
2.3 Frecuencias de las portadoras y esquemas de modulación	11
2.3.1 Portadora óptica y portadora RF.....	12
2.3.2 Esquemas de modulación y figuras de mérito	12
2.4 Radio definida por software	16
2.5 Sistemas de ROF utilizando Osciladores Optoelectrónicos OEO.....	17
2.5.1 Estado del arte	17
3. Caracterización del sistema de radio sobre fibra (ROF)	20
3.1 Arquitectura del sistema propuesto de ROF	20
3.2 Caracterización de componentes	21

3.2.1	Fuente láser.....	22
3.2.2	Modulador Mach-Zehnder (MZM)	25
3.2.3	Antenas	27
3.2.4	USRP, fotodetector, fibra óptica y amplificadores.....	27
3.3	Metodología de trabajo para el desarrollo de las pruebas del sistema ROF	28
3.4	Desempeño del sistema de ROF.....	31
4.	Caracterización del oscilador optoelectrónico (OEO)	45
4.1	Arquitectura del OEO.....	45
4.2	Caracterización de componentes	46
4.2.1	Fuente láser.....	46
4.2.2	Fotodetector (PD)	49
4.2.3	Filtro pasa banda.....	50
4.2.4	Modulador Mach Zehnder, fibra óptica, amplificadores y acoplador eléctrico	51
4.3	Metodología de trabajo para las pruebas del OEO.....	52
4.4	Desempeño del OEO	53
5.	Sistema ROF integrado con un OEO.....	61
5.1	Arquitectura planteada para integrar un sistema ROF con un OEO	61
5.2	Metodología de simulación para el sistema de ROF con el OEO	62
5.3	Desempeño de la integración del OEO y el sistema ROF.....	62
6.	Conclusiones y recomendaciones	71
6.1	Conclusiones	71
6.2	Recomendaciones y trabajo futuro	72
A.	Anexo A: Modulaciones digitales	73
B.	Anexo B: Esquemas de Software.....	76
C.	Anexo C: Manejo de instrumentos y esquemas de medición.....	82
D.	Anexo D: Resultados de pruebas en Radio sobre Fibra.....	84
	Bibliografía	93

Lista de figuras

	Pág.
Figura 2-1: Arquitectura básica de un sistema de radio sobre fibra.	5
Figura 2-2: Arquitectura de transmisión ROF: RF sobre fibra [14].	6
Figura 2-3: Arquitectura de transmisión ROF: IF sobre fibra [17].	6
Figura 2-4: Arquitectura de transmisión ROF: IF digitalizado sobre fibra [18].	7
Figura 2-5: Esquema general de un oscilador optoelectrónico [19].	7
Figura 2-6: Comportamiento espectral RF de un OEO [24].	9
Figura 2-7.: Definición de EVM en un diagrama de constelación QPSK.	14
Figura 2-8.: Relación entre las figuras de mérito para QPSK, 16QAM y 64QAM.	16
Figura 2-9.: Esquema de transmisión de un sistema de ROF utilizando un OEO como oscilador local.	17
Figura 2-10.: Idea de un enlace ROF utilizando un OEO centralizado [52].	18
Figura 3-1.: Arquitectura de ROF planteada.	20
Figura 3-2.: Esquema para obtener la potencia óptica del láser.	23
Figura 3-3.: Caracterización del láser FITEL: corriente de polarización vs potencia óptica del láser DFB para diferentes temperaturas.	23
Figura 3-4.: Caracterización del láser FITEL: evolución de las longitudes de onda en función de la corriente de polarización.	24
Figura 3-5.: Caracterización del láser FITEL: longitud de onda vs potencia óptica, con una corriente de polarización de 40mA a 25°C.	25
Figura 3-6.: Esquema de medidas para la caracterización del MZM.	26
Figura 3-7.: Caracterización del MZM: potencia óptica y corriente en el fotodetector en función del voltaje de polarización. Presentando el punto Q.	26
Figura 3-8.: Caracterización de antenas: S11 y VSWR en función de la frecuencia.	27
Figura 3-9.: Montaje del sistema ROF en transmisión.	34
Figura 3-10.: Montaje del sistema ROF en recepción.	35
Figura 3-11.: Muestra de resultados obtenidos para transmisión USRP-USRP.	36

Figura 3-12.: Imagen transmitida vs imagen recuperada: 64QAM a 3 metros.....	36
Figura 3-13.: Resultados obtenidos en EVM, SNR y BER.	38
Figura 3-14.: Relación entre el SNR y el MER, en una modulación 16QAM a 3 metros de distancia.	41
Figura 3-15.: Espectro recibido en 64QAM a 3 metros de distancia.....	42
Figura 3-16.: Resultados obtenidos para QPSK a una distancia de 1 metro.....	43
Figura 3-17.: Prueba de transmisión a 64QAM, 3 metros de distancia, aumentando la potencia óptica.	44
Figura 4-1.: Arquitectura del OEO planteada.	45
Figura 4-2.: Caracterización del láser Thorlabs: corriente de polarización vs potencia óptica del láser DFB para diferentes temperaturas.	47
Figura 4-3.: Caracterización del láser Thorlabs: evolución de las longitudes de onda en función de la corriente de polarización.	48
Figura 4-4.: Caracterización del láser Thorlabs: longitud de onda vs potencia óptica, con una corriente de polarización de 27mA a 25°C.	48
Figura 4-5.: Esquema para la caracterización del PD.	49
Figura 4-6.: Caracterización del PD Newport: responsividad dada la potencia óptica vs la corriente en el fotodetector.	50
Figura 4-7.: Caracterización del filtro: parámetros S11 y S21.	51
Figura 4-8.: Esquema de medición en lazo abierto.....	53
Figura 4-9.: Medidas de parámetros S11 en magnitud y carta de Smith, medida de S21 para el OEO en lazo abierto, sin etapa de amplificación.	54
Figura 4-10.: Medidas de parámetros S11 en magnitud y carta de Smith, medida de S21 para el OEO en lazo abierto, con etapa de amplificación.	55
Figura 4-11.: Montaje del OEO.	56
Figura 4-12.: Espectro eléctrico medido del OEO a 5,8GHz con span de 1MHz y RBW de 300Hz.....	57
Figura 4-13.: Ruido de fase para el OEO a 5,8GHz con diferentes longitudes en la FO. ..	58
Figura 4-14.: Prueba de estabilidad en el OEO.....	59

Figura 5-1.: Modelo de integración del sistema ROF y el OEO.....	61
Figura 5-2.: Esquema de simulación para el sistema ROF, en modulación QPSK.	63
Figura 5-3.: Resultados de la simulación del sistema ROF: Potencia óptica vs BER	64
Figura 5-4.: Esquema de simulación para el OEO.....	65
Figura 5-5.: Resultado de la simulación del OEO con filtro de 1MHz.....	66
Figura 5-6.: Esquema de simulación para la integración del sistema ROF con el OEO. ...	67
Figura 5-7.: Diagrama de ojo y medidas de BER para simulación en QPSK.....	68
Figura 5-8.: Resultados de la simulación del sistema integrado: diagramas de constelación, EVM y SNR para condiciones iniciales establecidas.	68
Figura 5-9.: Resultado del sistema integrado: variación en la distancia de transmisión de la fibra vs BER.....	69
Figura 5-10.: Resultado del sistema integrado: variación en la distancia de transmisión de la fibra vs EVM.....	70
Figura 5-11.: Resultado del sistema integrado: variación en la distancia de transmisión de la fibra vs SNR.....	70
Figura A-6-1.: Diagrama de constelación para la modulación QPSK	74
Figura A-6-2.: Diagrama de constelación para la modulación 16QAM.....	74
Figura A-6-3.: Diagrama de constelación para la modulación 64QAM.....	75
Figura A-6-4.: Bloques de transmisión en GNURadio.....	79
Figura A-6-5.: Bloques de recepción en GNURadio.....	79
Figura A-6-6.: Herramienta para generar secuencias de transmisión.	82
Figura A-6-7.: Esquema de visualización de datos en ESA.	83

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 2-1.: Requerimientos mínimos para algunas de las figuras de mérito.	15
Tabla 2-2.: Revisión de aplicaciones de OEO en ROF.....	19
Tabla 3-1.: Instrumentos de medición utilizados.....	22
Tabla 3-2.: Características del USRP, fotodetector, fibra óptica y amplificadores.	28
Tabla 3-3.: Metodología para las pruebas realizadas en el sistema de ROF.....	30
Tabla 3-4.: Resultados obtenidos para los primeros tres escenarios, receptor USRP.....	32
Tabla 3-5.: Resultados obtenidos para los primeros tres escenarios, receptor ESA.	32
Tabla 3-6.: Promedio y desviación estándar de figuras de mérito, distancia de 1 metro, receptor ESA.....	39
Tabla 3-7.: Promedio y desviación estándar de figuras de mérito, distancia de 3 metros, receptor ESA.....	40
Tabla 3-8.: Promedio y desviación estándar de figuras de mérito, distancia de 6 metros, receptor ESA.....	40
Tabla 4-1.: Características del modulador Mach-Zehnder, la fibra óptica, los amplificadores y el acoplador eléctrico.	52
Tabla 4-2.: Resultados consolidados de las medidas realizadas en el OEO a diferentes FO.	58
Tabla A-6-1.: Resultados de pruebas ROF a 1 metro de distancia, recepción en USRP....	84
Tabla A-6-2.: Resultados de pruebas ROF a 3 metros de distancia, recepción en USRP. .	85
Tabla A-6-3.: Resultados de pruebas ROF a 6 metros de distancia, recepción en USRP. .	86
Tabla A-6-4.: Resultados de pruebas ROF a 1 metro de distancia, recepción en ESA.	88
Tabla A-6-5.: Resultados de pruebas ROF a 3 metros de distancia, recepción en ESA.....	90
Tabla A-6-6.: Resultados de pruebas ROF a 6 metros de distancia, recepción en ESA.....	92

1. Introducción

Durante los últimos años la industria de las telecomunicaciones ha enfrentado un enorme crecimiento en su número de usuarios en todo el mundo [1], esto sumado al surgimiento de nuevos servicios o tecnologías, genera una mayor carga en los sistemas de comunicaciones actuales.

La actual demanda de servicios no solo exige mantener comunicadas a las personas, sino también a cualquier elemento del entorno, garantizando una conexión de forma permanente, mayor cobertura y una amplia movilidad [2]. Todas estas características demandan un mayor ancho de banda, que no alcanzará a ser suministrado en su totalidad por las actuales tecnologías de acceso inalámbrico, requiriendo el uso de frecuencias más altas [3].

Esta necesidad de mejorar los sistemas de telecomunicaciones ha llevado a explorar nuevas soluciones, presentándose las redes basadas en fibra óptica como una buena alternativa. Gracias a estas redes, se alcanzan anchos de banda del orden de los terahertz (THz) con velocidades del orden de los Gigabits por segundo (Gbps) [4]. Sin embargo, las aplicaciones finales requieren consumir servicios de forma móvil, disfrutando de la misma experiencia, sin estar conectados a una red fija.

Los sistemas de radio sobre fibra óptica, ROF (*radio-over-fiber*), integran las ventajas de ambas tecnologías: las fibras ópticas y las redes inalámbricas [5]. ROF ha sido utilizado y estudiado para satisfacer el enorme crecimiento en la industria de las telecomunicaciones, especialmente en el servicio de datos inalámbricos [4].

Uno de los principales retos para el progreso de estos sistemas, se encuentra en el desarrollo de osciladores de alta estabilidad que garanticen un excelente rendimiento de las comunicaciones en altas frecuencias, dado que la pureza de la portadora de radiofrecuencia (RF) es vital para la calidad en general de cualquier sistema de comunicaciones [6]. Los osciladores optoelectrónicos, (OEO – *optoelectronic oscillators*), se presentan como una solución a esta demanda garantizando un alto rendimiento gracias a su alta estabilidad y bajo ruido de fase, en aplicaciones como sistemas de radar, de comunicaciones satelitales, de

transmisión para vehículos no tripulados, de comunicaciones móviles, de navegación o de medición de alta precisión, entre otros [7].

Particularmente, existen sistemas ROF que integran un OEO para su funcionamiento [8]–[10] en donde se ha logrado mejorar las características de transmisión, en comparación a los sistemas tradicionales. Es por lo anterior que surge el interés de desarrollar este tipo de sistema en la Universidad Nacional de Colombia, en donde en el Grupo de Investigación en Electrónica de Altas Frecuencias y Telecomunicaciones CMUN se han desarrollado diversos trabajos relacionados con OEO y ROF.

De acuerdo con lo planteado anteriormente, en este documento se presenta el proceso de diseño y simulación de un sistema de radio sobre fibra (ROF) basado en un oscilador optoelectrónico. Los resultados de cada paso del proceso de investigación que se llevaron a cabo para lograr los objetivos planteados se presentan en seis capítulos, organizados de la siguiente manera:

En el primer capítulo se resume el interés del trabajo en una breve introducción.

En el segundo capítulo, se presenta el marco teórico y estado del arte, con los conceptos básicos y principales investigaciones en el campo de los sistemas ROF, OEO, modelos del canal, esquemas de modulación, figuras de mérito y aplicaciones conjuntas de OEO/ROF.

El tercer capítulo hace referencia a la caracterización del sistema ROF desarrollado, presentando los resultados obtenidos y mostrando su funcionalidad.

En el cuarto capítulo se presenta la caracterización de un OEO, explicando la arquitectura seleccionada y presentando los resultados obtenidos.

El quinto capítulo detalla la simulación realizada en el software Optisystem, en el cual se integra el sistema ROF con el OEO desarrollado, presentando los resultados obtenidos y analizando distintos escenarios de prueba.

Finalmente, el sexto capítulo muestra las conclusiones derivadas de este trabajo de investigación y los posibles escenarios para trabajos futuros de acuerdo con los resultados obtenidos.

Como convención, durante el desarrollo del trabajo los elementos de color café (■) representan conexiones o elementos eléctricos, mientras que los elementos de color azul (■) representan conexiones o elementos ópticos.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo general

- Diseñar e implementar mediante simulación un sistema de Radio sobre Fibra utilizando un oscilador optoelectrónico.

1.1.2 Objetivos específicos

- Identificar las características y requerimientos para el transporte de señales en los sistemas de radio sobre fibra actuales, en términos de frecuencias, modulaciones o anchos de banda.
- Evaluar el desempeño de un sistema de radio sobre fibra para diferentes aplicaciones empleando distintas frecuencias y modulaciones.
- Diseñar e implementar un oscilador optoelectrónico para un sistema de Radio sobre Fibra.
- Integrar mediante una simulación el oscilador optoelectrónico diseñado en un sistema de radio sobre fibra.

2. Marco teórico y estado del arte

En este capítulo se presentan las principales características de los conceptos de radio sobre fibra y sus posibles arquitecturas, osciladores optoelectrónicos y el ruido presente en ellos, modelamiento del canal, componente espectral, esquemas de modulación y figuras de mérito, radio definido por software y un estado del arte de aplicaciones conjuntas de radio sobre fibra y osciladores optoelectrónicos.

2.1 Sistemas de Radio sobre Fibra

En los sistemas de Radio sobre Fibra (ROF) se integra la transmisión de señales de radiofrecuencia (RF), que se caracterizan por su flexibilidad y movilidad, a través de las redes de fibra óptica y su baja atenuación junto con su amplio ancho de banda (BW – *bandwidth*) [4]. ROF presenta esencialmente un sistema de comunicación analógico, aunque su enlace inalámbrico transmita datos digitales.

La arquitectura de ROF cuenta con una estación central (CO – *central office*), en donde se procesan, modulan y convierten la señal de radio para ser transmitida por la fibra óptica hasta la estación base (BS – *base station*). En la BS, se procesa la señal RF que será transmitida de forma inalámbrica hasta las estaciones móviles (MS – *mobile station*) [11].

En la Figura 2-1: Arquitectura básica de un sistema de radio sobre fibra. Figura 2-1 se presenta la arquitectura básica de un sistema ROF de bajada (*downlink*) punto a punto, sin algunos bloques esenciales como amplificación y filtrado [12]. Esta arquitectura fue la base para el desarrollo del presente trabajo.

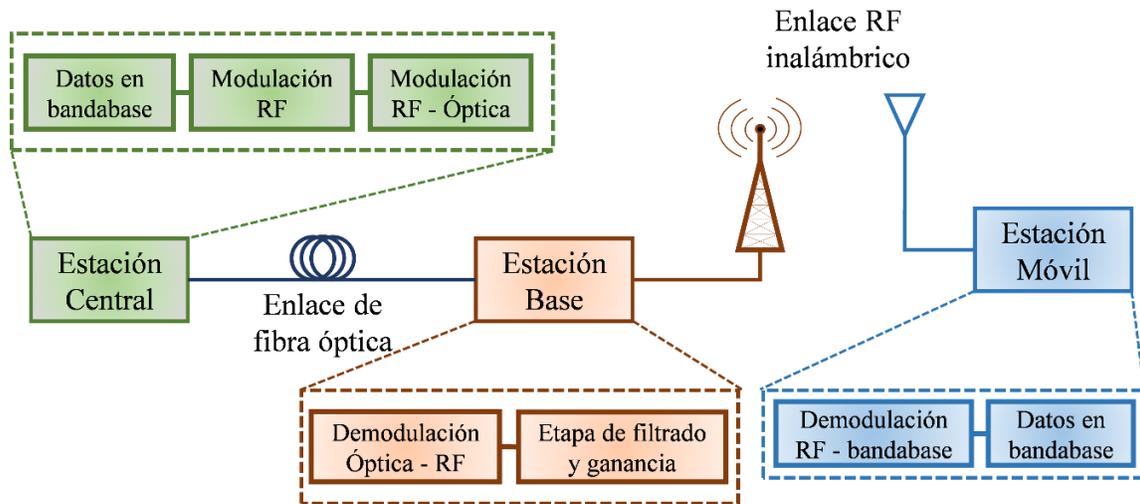


Figura 2-1: Arquitectura básica de un sistema de radio sobre fibra.

En su esquema completo (punto a multipunto), la señal RF (multiplexada) se distribuye, haciendo uso de las redes de fibra óptica, hacia varias EB o unidades de acceso de radio (RAU – *radio access units*) [5].

En el proceso de transmisión en una red ROF, resulta importante distinguir los dos tipos de modulación presentes en su esquema. La primera es la modulación RF, la cual obtiene sus características de acuerdo con los requerimientos de la red inalámbrica, la señal portadora se modula por la secuencia de información en banda base [13]. La segunda es la modulación RF – óptica, en donde una portadora óptica se modula con la señal de RF, pasando de un entorno eléctrico a uno óptico, para luego ser transmitida por la red de fibra óptica [5]. Este proceso se puede realizar de dos formas, modulando directamente la fuente láser o utilizando un modulador externo. Para el desarrollo de este trabajo se utilizaron únicamente las técnicas de modulación externa.

2.1.1 Arquitecturas de trabajo en ROF

Con el fin de implementar los enlaces de ROF, se pueden aplicar diferentes arquitecturas, se explicarán tres de estas:

1. RF sobre fibra, es el método más simple en donde la señal RF modula la portadora óptica, con ayuda del modulador electroóptico (MZM – *Mach Zehnder modulator*), siendo transportada por la fibra óptica (FO) para luego ser detectada usando un fotodetector (PD – *photodetector*). Después de una adecuada etapa de filtrado y amplificación la señal es transmitida de forma inalámbrica. En la Figura 2-2, se presenta esta arquitectura.

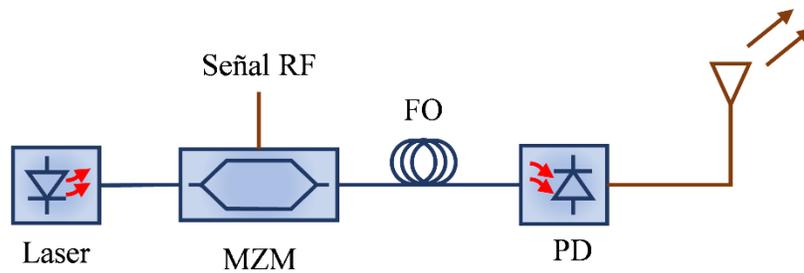


Figura 2-2: Arquitectura de transmisión ROF: RF sobre fibra [14].

2. IF sobre fibra, con este método la señal RF se convierte a una señal intermedia (IF – *intermediate frequency*) más baja antes de enviarse al MZM. Después de la recepción en el fotodetector la señal IF se convierte a la señal RF requerida para la transmisión inalámbrica. Esta técnica reduce los efectos de degradación en la fibra, especialmente los de la dispersión cromática [15]. Se suele utilizar especialmente si la frecuencia operativa es alta, como por ejemplo en un sistema de ondas milimétricas (mmw – *milimeter wave*) [16].

Requiere de hardware electrónico adicional para realizar las conversiones de RF-IF y IF-RF con ayuda de osciladores locales (LO – *local oscillator*). En la Figura 2-3, se presenta esta arquitectura.

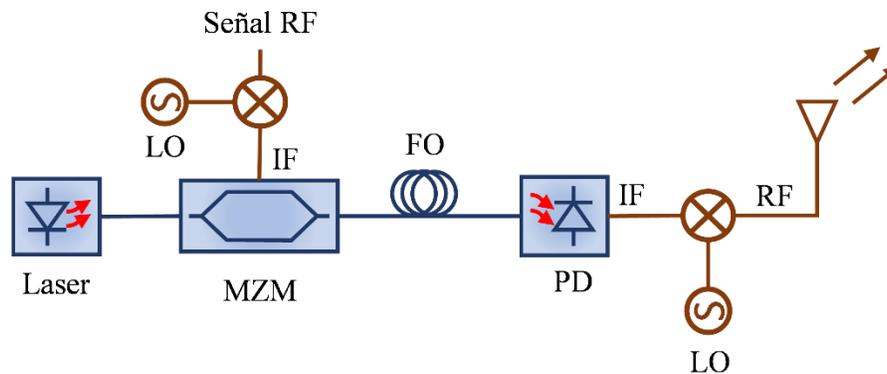


Figura 2-3: Arquitectura de transmisión ROF: IF sobre fibra [17].

3. IF digitalizada sobre fibra, con este método se busca minimizar los requisitos de ancho de banda durante el proceso de digitalización. La adición de los convertidores análogo-digital (A/D) y digital-análogo (D/A) proporciona inmunidad a la degradación de la relación señal a ruido presente en los enfoques analógicos presentados anteriormente [18]. Este enfoque se presenta en la Figura 2-4.

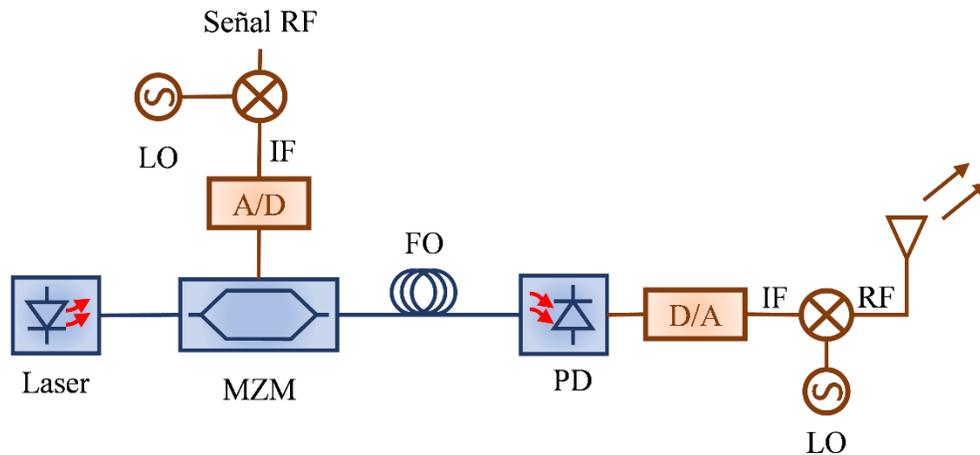


Figura 2-4: Arquitectura de transmisión ROF: IF digitalizado sobre fibra [18].

2.2 Oscilador optoelectrónico

El Oscilador Optoelectrónico (OEO), es un sistema auto oscilante con retroalimentación retardada, que utiliza una fuente de luz modulada conectada a una línea de retardo de fibra óptica y un fotodetector. Esta señal electrónica pasa por un esquema de filtrado y amplificación completando el bloque de oscilación por medio de un acoplador eléctrico llevando la señal eléctrica a modular la fuente óptica [7]. En la Figura 2-5 se presenta el esquema general de un OEO.

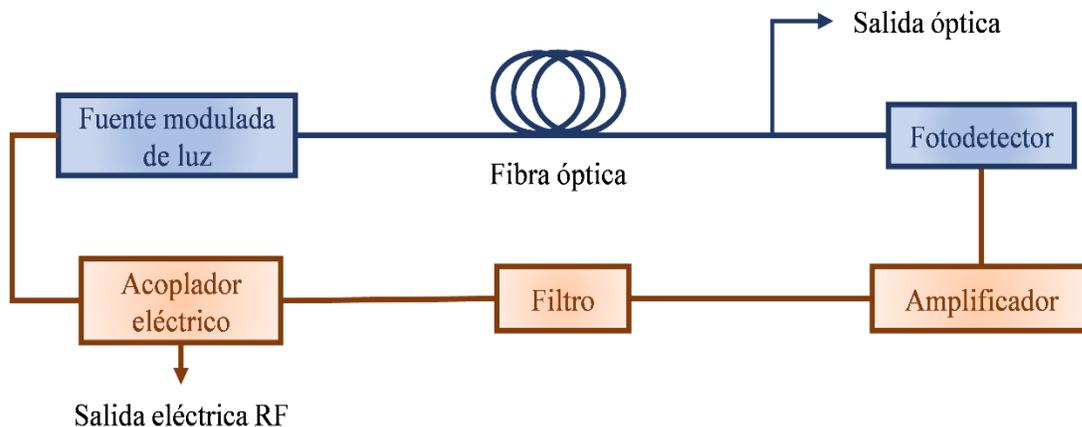


Figura 2-5: Esquema general de un oscilador optoelectrónico [19].

Se consideran dos tipos de OEO, que difieren en el tipo de modulación:

1. OEO con modulación directa de emisión en el láser.
2. OEO con modulación de emisión externa utilizando un modulador electróptico.

Para el desarrollo de este trabajo, se aplicó la técnica de modulación externa.

Con el fin de garantizar una oscilación, es necesario satisfacer las dos condiciones de Barkhausen: condición de ganancia y condición de fase [20]. Estos valores pueden ser cuantificados mediante la Ecuación (2-1) y la Ecuación (2-2):

$$|G_{OL}| = 1 \quad (2-1)$$

$$\omega_{RF}\tau + \phi_0 = 2k\pi \quad (2-2)$$

Donde:

- G_{OL} : Ganancia en lazo abierto del sistema.
- ω_{RF} : Frecuencia angular de la señal RF.
- τ : Tiempo de retardo del lazo.
- ϕ_0 : Ruido de fase como variación aleatoria del sistema.
- k : Cualquier número entero.

La frecuencia de oscilación está dada por la Ecuación (2-3):

$$f_{osc} = \frac{k}{\tau} - \frac{\phi_0}{2\pi\tau} \quad (2-3)$$

El rango espectral libre (FSR – *free spectral range*) es la diferencia de longitud de onda entre dos modos resonantes consecutivos en el espectro de salida del oscilador [21]. Es un parámetro clave en el diseño de un OEO, ya que determina su rango de sintonía y afecta el ancho de línea de la señal de salida [22]. Es dado por la Ecuación (2-4):

$$FSR = \frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_F + \tau_C} \quad (2-4)$$

Donde:

- τ_C : Retardo de tiempo debido a los componentes eléctricos.
- τ_F : Retardo de tiempo debido a la fibra óptica. Se define por la Ecuación (2-5):

$$\tau_F = \frac{n_F L}{c} \quad (2-5)$$

Donde:

- n_F : Índice de refracción de la fibra óptica.
- L : Longitud de la fibra óptica.
- c : Velocidad de la luz.

Finalmente, el filtro cumple la función de atenuar las señales RF no deseadas ubicando la frecuencia de oscilación en el rango operativo deseado. También cumple la función de mejorar la relación señal a ruido y la estabilidad del oscilador [23]. En la Figura 2-6 se presenta el comportamiento espectral del OEO en cada una de las etapas eléctricas, sus modos y también se presenta el FSR.

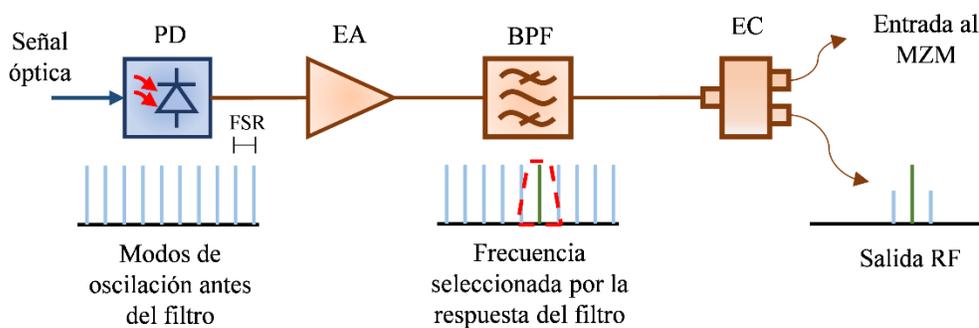


Figura 2-6: Comportamiento espectral RF de un OEO [24].

Donde se presentan el amplificador eléctrico (EA – *electrical amplifier*), el filtro pasa-banda (BPF – *bandpass filter*) y el acoplador eléctrico (EC – *electrical coupler*).

2.2.1 Ruido de fase

El ruido de fase (PN – *phase noise*) en los OEO hace referencia a la variación no controlada de la frecuencia y la fase de la señal óptica generada, afectando la estabilidad y precisión de esta [6].

Dado que la calidad de un OEO depende de su estabilidad, el ruido de fase se utiliza como figura de mérito [22]. En los sistemas de ROF el ruido de fase es particularmente crítico ya que afecta la precisión de la modulación de la señal y en consecuencia la calidad de la transmisión.

A pesar de la naturaleza temporal del ruido de fase, se suele medir en la cantidad de atenuación en decibeles (dB) con relación a la potencia de la señal de la portadora en un ancho de banda establecido (dBc/Hz @ BW). En general, cuanto menor sea la figura de ruido de fase, mejor será la calidad de la señal y la capacidad del oscilador para mantener una frecuencia estable y precisa en presencia de ruido. [25].

2.2.2 Ruido asociado a los componentes del oscilador

Cada componente del OEO introduce cierta señal de ruido al sistema del OEO, debido a las no linealidades en la respuesta de frecuencia de los componentes ópticos y electrónicos del oscilador [26], a las propiedades intrínsecas de los materiales y a perturbaciones externas [20].

Existen distintos modelos para analizar el ruido de fase en los OEO [22], [27]. El modelo de Leeson es ampliamente utilizado en la industria y en investigación para caracterizar el ruido en los OEO, ya que describe cómo el ruido en los componentes individuales del oscilador se combina y se amplifica en el circuito, lo que resulta en fluctuaciones en la frecuencia de oscilación y en el ruido de fase del oscilador.

Utilizando el modelo de Leeson, es posible predecir la densidad espectral de potencia de fase S_φ en la salida del oscilador a partir de las fluctuaciones de densidad espectral de fase en la entrada del oscilador $S_{\Delta\theta}$. Es dado por la Ecuación (2-6) [28]:

$$S_\varphi(f) = S_{\Delta\theta} \left[1 + \left(\frac{f_o}{2Qf} \right)^2 \right] \quad (2-6)$$

Donde:

- f_o : frecuencia de resonancia del láser.
- Q : factor de calidad del láser.
- f : frecuencia de oscilación del OEO.

A partir de la anterior ecuación, se calcula el ruido de fase una vez determinadas las fuentes de ruido. A continuación, se presentan algunas de las principales fuentes de ruido [20]:

- Ruido relativo de intensidad (RIN – *Relative Intensity Noise*) de la fibra óptica:

Es dado por las fluctuaciones aleatorias en la amplitud de la luz que se propaga a través de la fibra óptica. Son causadas por la variación del índice de refracción, la atenuación y las fluctuaciones de temperatura en la fibra óptica. Se mide de forma independiente y se asume como constante para la banda de frecuencias de interés.

- RIN del láser:

Causado por las variaciones aleatorias en la emisión de luz del láser, debido a factores como la inestabilidad térmica, la fluctuación de la corriente o la inestabilidad del acoplamiento de modos.

- Ruido shot del fotodetector (*shot noise*):

Se origina debido a la naturaleza cuántica en la electrónica del PD. Los fotones llegan en forma de paquetes aleatorios lo que genera una variación en la cantidad de fotones detectados. Debido a que la generación de electrones y huecos en el material del PD es un proceso aleatorio, esta variación en la cantidad de fotones detectados se traduce en fluctuaciones en la corriente eléctrica medida en la salida del detector, a esto se le conoce como ruido shot [29]. El ruido shot se puede modelar como una corriente de ruido blanco con una densidad espectral de potencia proporcional a la corriente promedio del PD [20].

- Ruido térmico dentro del sistema:

Se genera por las variaciones aleatorias en la energía de las partículas debido a la temperatura. Se suele modelar como ruido blanco Gaussiano (AWGN – *Additive white Gaussian noise*) y suele afectar al PD.

2.3 Frecuencias de las portadoras y esquemas de modulación

Ante la demanda actual de servicios inalámbricos, han surgido múltiples tecnologías de acceso de radio, lo que ha diversificado las características para la transmisión de señales, estandarizando sus propiedades de acuerdo con la aplicación requerida [30]. Esto establece los principales componentes para el diseño de una red basada en ROF.

Organismos como la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU – *International Telecommunication Union*) [31], el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE – *Institute of Electrical and Electronics Engineers*) [32] o el Instituto Europeo de Normas de Telecomunicaciones (ETSI – *European Telecommunications Standards Institute*) [33], determinan las especificaciones técnicas u otros criterios que regulan las transmisiones en los sistemas de comunicación, garantizando un rendimiento adecuado del sistema de ROF.

Con el fin de mantener unas condiciones óptimas durante la transmisión, es necesario determinar ciertas características del diseño de la red. A continuación, se describen algunos de los principales factores que deben considerarse.

2.3.1 Portadora óptica y portadora RF

En un sistema de ROF, se deben considerar dos componentes espectrales:

- Portadora óptica: dada por la gama de longitudes de onda entre los 600 nm y los 1650 nm. Es determinada por la fuente óptica utilizada, destacando la banda O (1260nm – 1360nm) y la banda C (1530nm – 1565nm) [34]. En general, el transporte de la portadora óptica modulada, no se ve afectada por las particularidades de la tecnología de acceso de radio (sea frecuencia de portadora RF, esquema de modulación, codificación, etc.), por lo que el factor de diseño a considerar es la portadora RF [21]. Durante el desarrollo de este trabajo se utilizaron dos fuentes ópticas láser tipo DFB a 1550nm (aproximadamente), una para la señal del enlace ROF (de alta potencia); y la otra para la señal del OEO (de baja potencia).
- Portadora de RF: viene dada por la aplicación deseada, regulada por la normativa para el uso del radioespectro [35]. Uno de los focos de aplicación se observa en el desarrollo de las redes móviles 5G y próximamente de 6G, en donde las frecuencias portadoras reutilizarán el espectro actual junto con el espectro de ondas milimétricas (*mmw – millimeter wave*), brindando una amplia cobertura en todos los casos de uso (por debajo de 6 GHz) y una mejor capacidad (por encima de 6 GHz) [36]. Durante el desarrollo del presente trabajo, se utilizó la banda de 5,8 GHz, destinada para aplicaciones ISM (*Industrial, Scientific and Medical*), WiFi o radioenlaces punto a punto (P2P – *peer to peer*) [37].

2.3.2 Esquemas de modulación y figuras de mérito

Los sistemas de ROF requieren esquemas de modulación digital con el fin de aumentar la eficiencia espectral. El presente trabajo se desarrolló mediante el uso de modulaciones digitales por amplitud (QAM – *quadrature amplitude modulation*) y fase por cuadratura (PSK – *phase shifting key*) [38]. Estos esquemas de modulación son ampliamente utilizados por los distintos estándares para comunicaciones inalámbricas, su elección depende de los requisitos específicos de cada aplicación o del entorno en el que se utilizan [31], [32], [39], [40]. Durante el desarrollo del presente trabajo, se utilizaron los esquemas QPSK, 16QAM y 64QAM, algunos detalles y los diagramas de estos esquemas son presentados en el Anexo A: Modulaciones digitales.

Estos estándares mencionados, suelen incluir las medidas del desempeño para un sistema de transmisión, conocidas como figuras de mérito. A continuación, se presentan las principales figuras de mérito que se estudian en los sistemas de ROF:

- La relación señal a ruido (SNR – *signal to noise ratio*): Es la relación entre la potencia promedio de la señal útil y la potencia promedio del ruido. Entre más alto sea el SNR, mejor será el promedio de la señal útil resultando en una mejor calidad de la señal [38]. Se puede calcular mediante la Ecuación (2-7).

$$SNR[dB] = 10 \cdot \log \left(\frac{\text{Potencia de la señal}}{\text{Potencia del ruido}} \right) \quad (2-7)$$

La magnitud del vector de error (EVM – *error vector magnitude*): Es el error entre el vector error y el vector de referencia. Se representa como un porcentaje de la amplitud total de la señal modulada, apoyado en un diagrama de constelación, como se presenta en la Figura 2-7. En un diagrama de constelación cada símbolo transmitido se representa por un punto en un plano cartesiano donde el eje horizontal representa el componente de fase de la señal; el eje vertical representa la componente de cuadratura. La disposición de estos puntos y su separación entre sí dependen del esquema de modulación utilizado.

Entre más bajo sea el EVM indica una mayor precisión en la modulación resultando en un mejor rendimiento de la transmisión [13]. Puede cuantificarse mediante la Ecuación (2-8).

$$EVM[\%] = 100 \cdot \sqrt{\frac{\text{Potencia del vector error}}{\text{Potencia del vector de referencia}}} \quad (2-8)$$

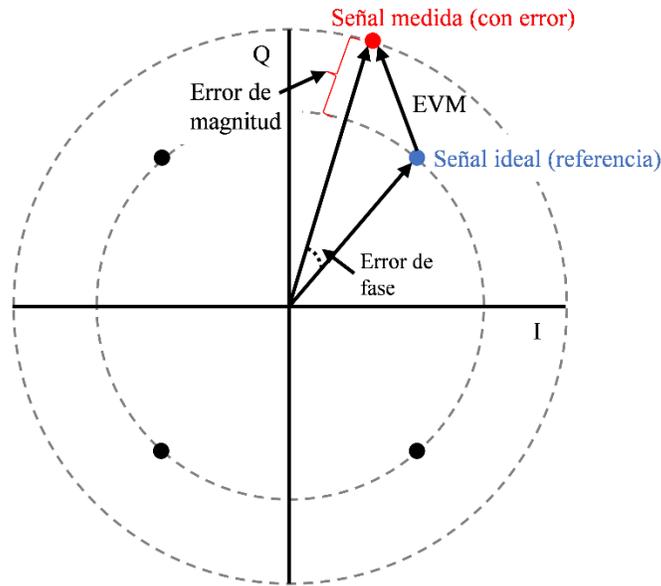


Figura 2-7.: Definición de EVM en un diagrama de constelación QPSK.

- La tasa de error de bit (BER – *bit error rate*): Indica la cantidad de errores en la transmisión de datos. Es la relación entre el número de bits incorrectos y el número total de bits transmitidos. Un bajo BER revela una menor cantidad de bits errados en la transmisión, resultando en una alta calidad en la transmisión de datos [41]. Se calcula mediante la Ecuación (2-9).

$$BER = \frac{\text{bits errados}}{\text{total de bits transmitidos}} \quad (2-9)$$

- La relación de errores de modulación (MER – *modulation error ratio*): Permite medir la calidad de la modulación. Es la relación entre la potencia de la señal modulada y la potencia de los errores de modulación. Gráficamente es similar al esquema presentado en la Figura 2-7, analizando la potencia de la señal de referencia y la potencia de la señal del vector error. Entre más alto sea el MER indica una baja tasa de error en la modulación [34].

$$MER = 10 \cdot \log \left(\frac{\text{Potencia de la señal de referencia}}{\text{Potencia del vector error}} \right) \quad (2-10)$$

La Tabla 2-1 presenta algunos de los valores límite para el SNR y el EVM, para algunos de los estándares y aplicaciones, en función de los esquemas de modulación utilizados en este trabajo.

Así mismo, se establecen los límites mínimos para el BER, en los diferentes esquemas de modulación de acuerdo con la corrección de errores hacia adelante (FEC – *Forward Error*

Correction) [42]. Los valores aproximados son de 10^{-3} para QPSK, 10^{-4} para 16QAM y 10^{-5} para 64QAM.

Norma	QPSK	16QAM	64QAM
ITU F.757-4 [43]	SNR: >10dB EVM: <17,5%	SNR: >14dB EVM: <12,5%	SNR: >16dB EVM: <8%
IEEE 802.11ac [44]	SNR: >9dB EVM: <17%	SNR: >13dB EVM: <12%	SNR: >17dB EVM: <7%
ETSI EN 302 217-4 [39], [45]	SNR: >10dB EVM: <17,5%	SNR: >14dB EVM: <12,5%	SNR: >17dB EVM: <8%

Tabla 2-1.: Requerimientos mínimos para algunas de las figuras de mérito.

Las figuras de mérito propuestas fueron seleccionadas debido a que ofrecen un tiempo de cálculo más corto y proporcionan una mejor precisión en los casos de análisis de espectro y diagramas de constelación [46], así como también se pueden relacionar entre ellas utilizando un modelo de canal AWGN [47], [48]. Estas relaciones se pueden ver reflejadas en la Figura 2-8:

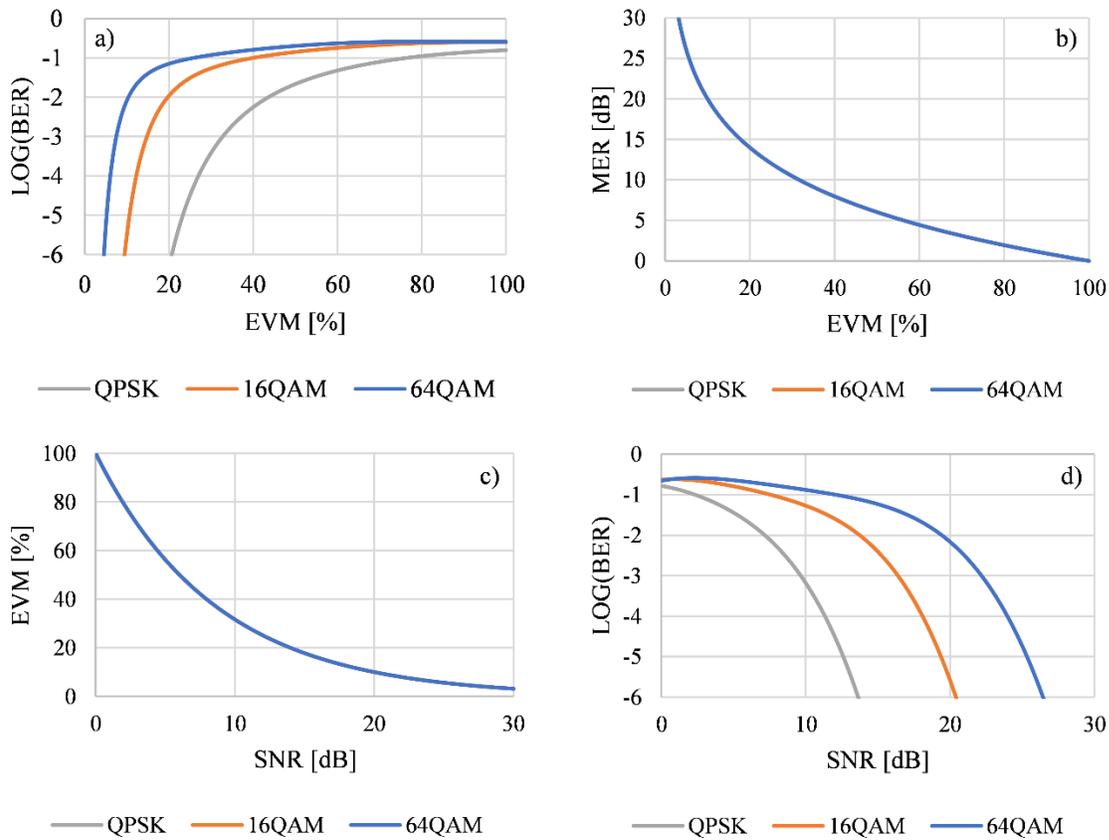


Figura 2-8.: Relación entre las figuras de mérito para QPSK, 16QAM y 64QAM.

En donde se presenta a) EVM vs BER; b) EVM vs MER; c) SNR vs EVM y d) SNR vs BER.

2.4 Radio definida por software

La radio definida por software (*SDR – software defined radio*), es un sistema de radiocomunicación en donde casi todas las funcionalidades de la capa física se implementan en software, haciendo uso de algoritmos de procesamiento de señal digital (*DSP – digital signal processor*). Puede utilizarse para diseñar distintos componentes o incluso sistemas completos [49].

Durante el desarrollo del presente proyecto se utilizó la SDR para modelar las etapas de transmisión y recepción, en cuanto a los procesos de modulación o digitalización, así como también en la obtención de algunos resultados. Esto se realizó con apoyo de herramientas como MATLAB y GNURadio [50] utilizando la plataforma de hardware USRP (*Universal Software*

Radio Peripheral). El dispositivo utilizado es el USRP b205-mini de Ettus Research. En el Anexo B: Esquemas de Software, se presentan los códigos y bosquejos utilizados en el presente trabajo.

2.5 Sistemas de ROF utilizando Osciladores Optoelectrónicos OEO

Los sistemas ROF han demostrado ser una tecnología eficiente y confiable para la transmisión de señales RF de alta calidad [4], [5], [12], [51], todo esto gracias a su capacidad para transportar señales de RF a través de fibra óptica. En estos sistemas, la calidad de la señal portadora de RF es crucial, ya que determina la frecuencia de la señal transmitida, además, garantiza una modulación y conversión de la señal RF a señales ópticas precisa y eficiente. Los OEO han demostrado ser una solución eficiente y de alta calidad, como generadores de señales estables y de alta calidad.

Tomando como base la arquitectura de ROF: IF sobre fibra, se plantea utilizar un OEO como oscilador local para un sistema de ROF. En este sistema, la señal de datos se modula con la señal portadora proveniente del OEO, generando una señal modulada RF, esta señal se utiliza para modular la señal óptica. Esta señal se transmite por la fibra óptica hasta el PD donde se demodula y se transmite de forma inalámbrica. En la Figura 2-9 se presenta el esquema básico planteado.

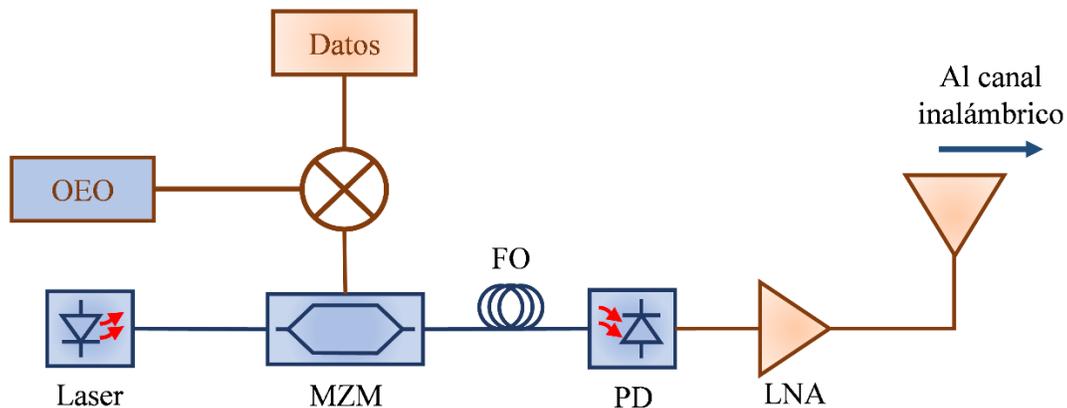


Figura 2-9.: Esquema de transmisión de un sistema de ROF utilizando un OEO como oscilador local.

2.5.1 Estado del arte

En 2016 se planteó un OEO de banda de 3GHz para ser utilizado en aplicaciones de 5G, utilizando el método de modulación directa. El autor propuso la idea de utilizar un OEO centralizado en la

CO para ser comunicado a las BS paralelamente al enlace de datos donde se mezcla. Esta idea se puede observar en la Figura 2-10. Se utilizaron dos longitudes distintas en el OEO, obteniendo un ruido de fase de $-120 \text{ dBc/Hz}@10\text{kHz}$ para una FO de 1km y $-130 \text{ dBc/Hz}@10\text{kHz}$ para una FO de 15km [52].

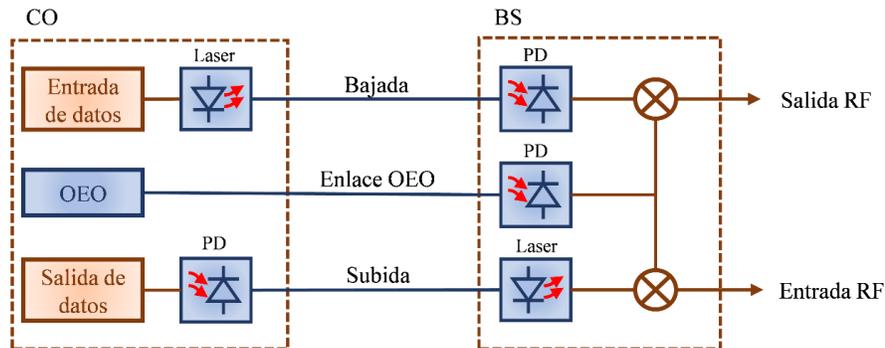


Figura 2-10.: Idea de un enlace ROF utilizando un OEO centralizado [52].

En 2021 se presentó un estudio completo de OEO para redes de próxima generación, mostrando las características y requisitos para las redes 5G y las próximas redes 6G. Se describió el rendimiento de las principales figuras de mérito como el EVM o el BER en función del ruido de fase [7]. En la Tabla 2-2 se presentan algunos otros estudios relacionados con la aplicación de OEO en enlaces ROF.

MRF ¹	MO ²	F (GHz)	OEO PN (dBc/Hz@10kHz)	L FO (km)	Distancia RF (m)	Figura de mérito	Año	Ref.
-	Externa	20	-94.5	75	-	BER: 10^{-5} a -6dBm^3 FD-OEO ⁴	2007	[53]
64QAM	Externa	10	-80	30	-	200Mbit/s EVM: 5,6% a -6dBm	2013	[54]
16QAM	Externa	3,5 y 7,5	-110	15 y 20	-	EVM: 5,6% a -6dBm	2014	[55]
-	Externa	40	-87	20	1	BER: 10^{-4} a -8dBm IL-OEO ⁵	2016	[56]
-	Externa	10	-94,5	20	-	BER: 10^{-7} a -4dBm	2019	[57]
QPSK/QAM	-	6.58	-103	40	0,3	BER: $3,8 \times 10^{-3}$	2020	[58]
-	Directa	9,95	-92	-	-	-	2021	[59]

Tabla 2-2.: Revisión de aplicaciones de OEO en ROF.

¹ MRF – Modulación RF

² MO – Modulación óptica (OEO y ROF)

³ Medida de BER en función de la potencia óptica recibida.

⁴ FD – Frequency doubling

⁵ IL – injection locked

3. Caracterización del sistema de radio sobre fibra (ROF)

Este capítulo está dividido en cuatro partes, en donde se presenta el modelo del sistema de ROF implementado, la caracterización de los componentes del sistema de ROF, la metodología de trabajo y los resultados obtenidos para el sistema. Esta implementación está centrada en el funcionamiento del sistema de ROF por lo que en esta etapa no se incorpora aún un OEO.

3.1 Arquitectura del sistema propuesto de ROF

Con el fin de evaluar el desempeño de un sistema ROF para diferentes aplicaciones, haciendo uso de los recursos disponibles y considerando los diferentes esquemas presentados se propone la arquitectura ilustrada en la Figura 3-1.

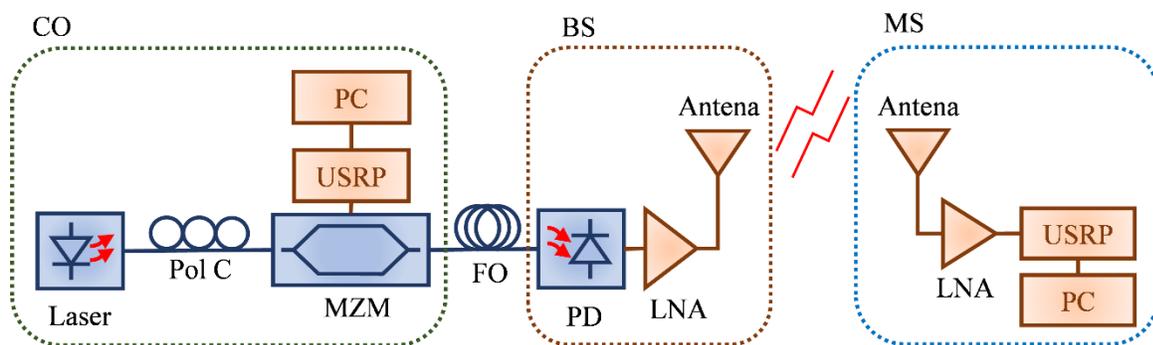


Figura 3-1.: Arquitectura de ROF planteada.

En donde se presentan el (Pol C – *Polarization Controller*) y el (LNA – *low noise amplifier*).

En esta arquitectura, la señal de datos es procesada por medio del USRP de transmisión para generar la señal modulada RF que será transmitida en el sistema. La señal se deja a una frecuencia central de 5,8 GHz, utilizando las modulaciones QPSK, 16QAM y 64QAM.

La portadora óptica es generada por el láser tipo DFB y con ayuda del MZM, es la encargada de modular ópticamente la señal RF modulada proveniente del USRP, generando así la señal óptica modulada, el control de polarización ayuda a maximizar la potencia de entrada al modulador. Posteriormente, esta señal es transmitida a través de la fibra óptica, hasta el PD, donde se demodula recuperando la señal modulada RF donde es amplificada por medio del LNA, para luego ser transmitida de forma inalámbrica con ayuda de una antena tipo log periódica.

En el extremo receptor, la señal es recibida por una antena de similares características, esta señal es nuevamente amplificada y procesada por el USRP de recepción, completando la transmisión, para finalmente evaluar las figuras de mérito.

A continuación, se presentan algunas de las características de diseño descritas en el capítulo 2 para el sistema de ROF:

- Es un enlace punto a punto.
- La transmisión es caracterizada únicamente como enlace de bajada (downlink).
- Se utiliza un esquema de modulación externo.
- De acuerdo con las arquitecturas planteadas, se considera que es RF sobre fibra.

3.2 Caracterización de componentes

De acuerdo con la arquitectura planteada en la Figura 3-1, se presenta la caracterización de cada uno de los elementos que componen el sistema de ROF. Con esta finalidad, en la Tabla 3-1 se presentan los instrumentos de medición utilizados para caracterizar cada uno de estos componentes.

Equipo	Referencia	Características
Fuente de corriente (CS)	Thorlabs ITC5022 [60]	Corriente de operación: 0 mA - 200 mA Resolución: 4 μ A
Analizador de espectro óptico (OSA)	Yokogawa AQ6370D [61]	Rango de longitud de onda: 600nm – 1700nm Resolución: 0,02nm Máxima potencia de entrada: 20 dBm
Medidor de potencia óptica (OPM)	Thorlabs PM100D [62]	Rango de detección: 800nm – 1700nm Rango 1nW a 20mW
Analizador de espectro eléctrico (ESA)	R&S FSW43 [63]	Rango de frecuencia: 2 Hz – 43,5 GHz BW: 320MHz Resolución: 0,01Hz y 0,001dB
Analizador vectorial de redes (VNA)	R&S ZNA26 [64]	Rango de frecuencia: 10 MHz – 26,5 GHz BW: hasta 2GHz Resolución: 0,001° y 0,001dB

Tabla 3-1.: Instrumentos de medición utilizados.

A continuación, se presenta la caracterización de los elementos empleados en la arquitectura propuesta:

3.2.1 Fuente láser

El láser utilizado como fuente óptica es de referencia Furukawa FITELE FR15DCWD-A81-19350 [65], con conector óptico FC/PC. Es un láser tipo DFB diseñado para aplicaciones DWDM en las bandas C y L (aproximadamente de 1530nm a 1625nm), según el ITU [66].

Inicialmente se realizó la medida de la potencia óptica en función de la corriente de polarización, donde también hay que considerar la temperatura de operación del láser. La corriente de polarización y la temperatura de operación son controlados por la fuente de corriente. A la salida del láser la potencia óptica se obtuvo con la ayuda del OPM. En la Figura 3-2 se presenta el esquema para conocer la potencia óptica del láser, en donde se presenta la fuente de corriente (CS – *current source*).

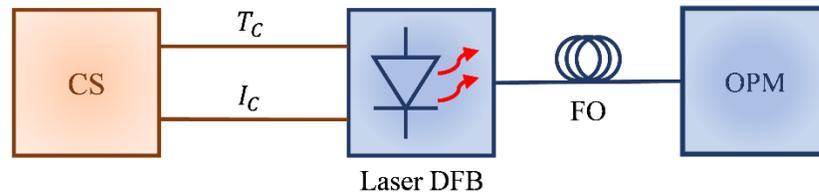


Figura 3-2.: Esquema para obtener la potencia óptica del láser.

Se aplicó una corriente de polarización en un rango de 10mA a 150mA en intervalos de 5mA, variando la temperatura de 20°C a 35°C en intervalos de 5°C. En la Figura 3-3 se presentan las potencias ópticas del láser, obtenidas en función de la corriente de polarización y la temperatura. Las mediciones realizadas indican que la corriente de polarización umbral se sitúa en torno a los 10mA con una eficiencia de la pendiente del láser de 0,228W/A.

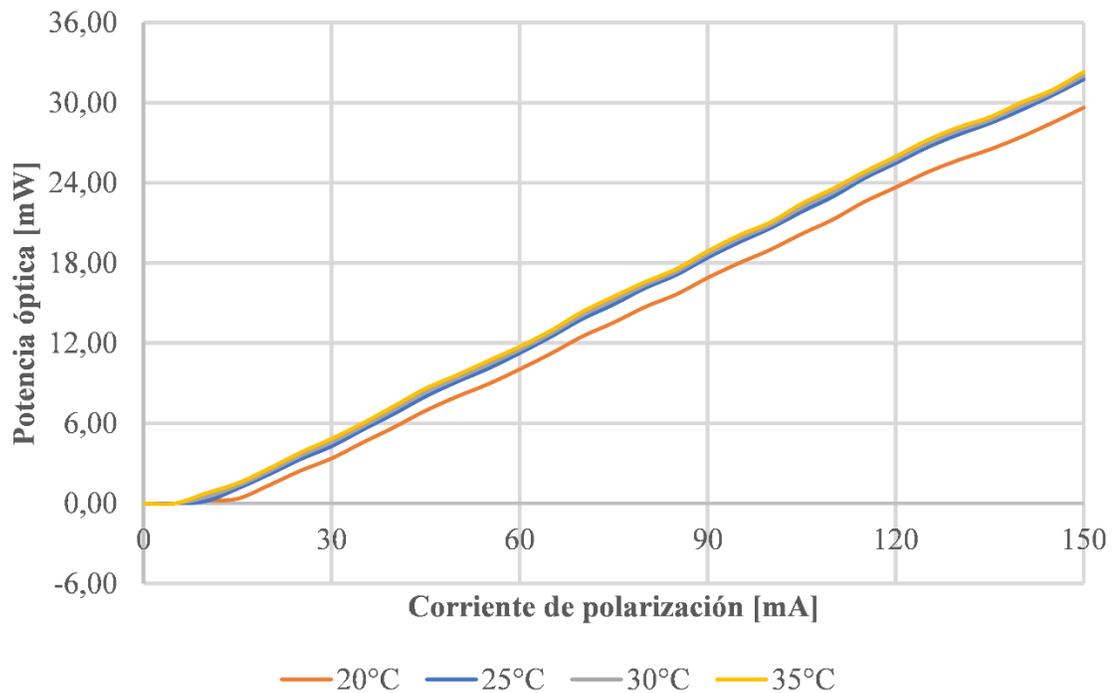


Figura 3-3.: Caracterización del láser FITEL: corriente de polarización vs potencia óptica del láser DFB para diferentes temperaturas.

Tomando como referencia la Figura 3-2, sustituyendo el OPM por el OSA y aplicando las mismas variaciones en la corriente de polarización y la temperatura del láser, se logró obtener la longitud de onda central del láser. En la Figura 3-4 se presentan las diferentes longitudes de onda centrales del láser, obtenidas en función de la corriente de polarización y temperatura. Se observa que la longitud de onda se desplaza a medida que aumenta la corriente de polarización.

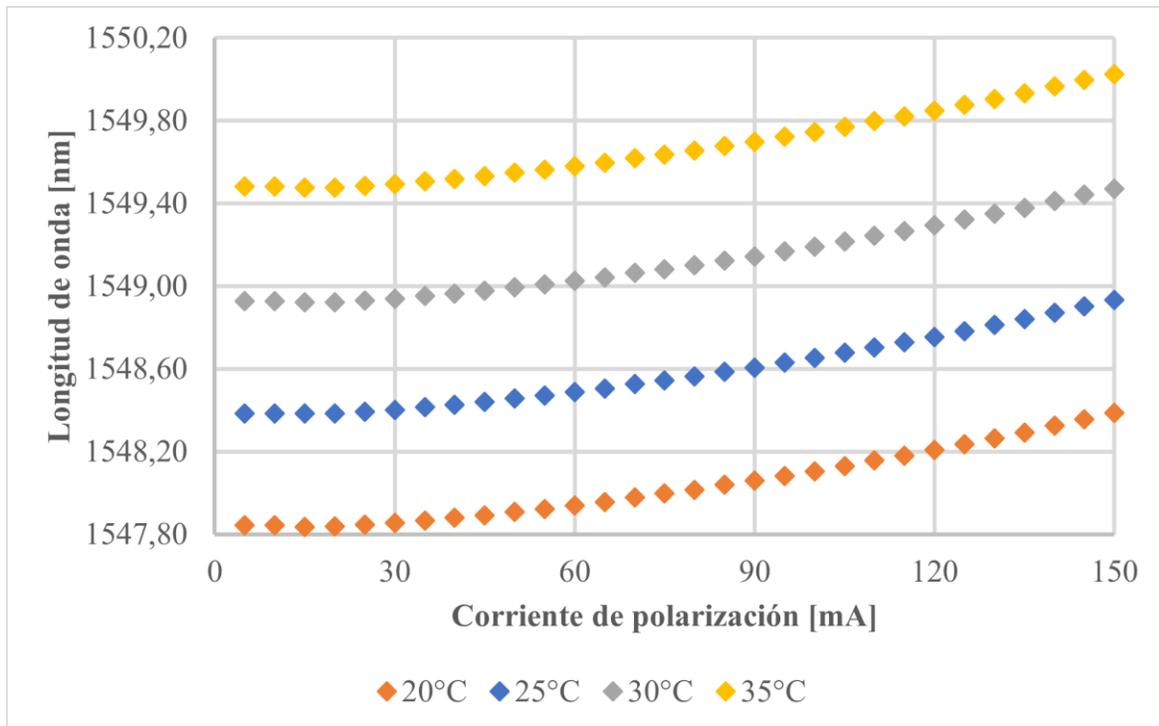


Figura 3-4.: Caracterización del láser FITEL: evolución de las longitudes de onda en función de la corriente de polarización.

Finalmente, en la Figura 3-5 se presenta el espectro del láser, utilizando el montaje anterior y tomando como referencia una corriente de polarización de 40mA a 25°C. En esta Figura se puede apreciar que la supresión del modo lateral alcanza los 53 dB, superando el umbral de los 30 dB, indicando que se trata de un láser monomodo.

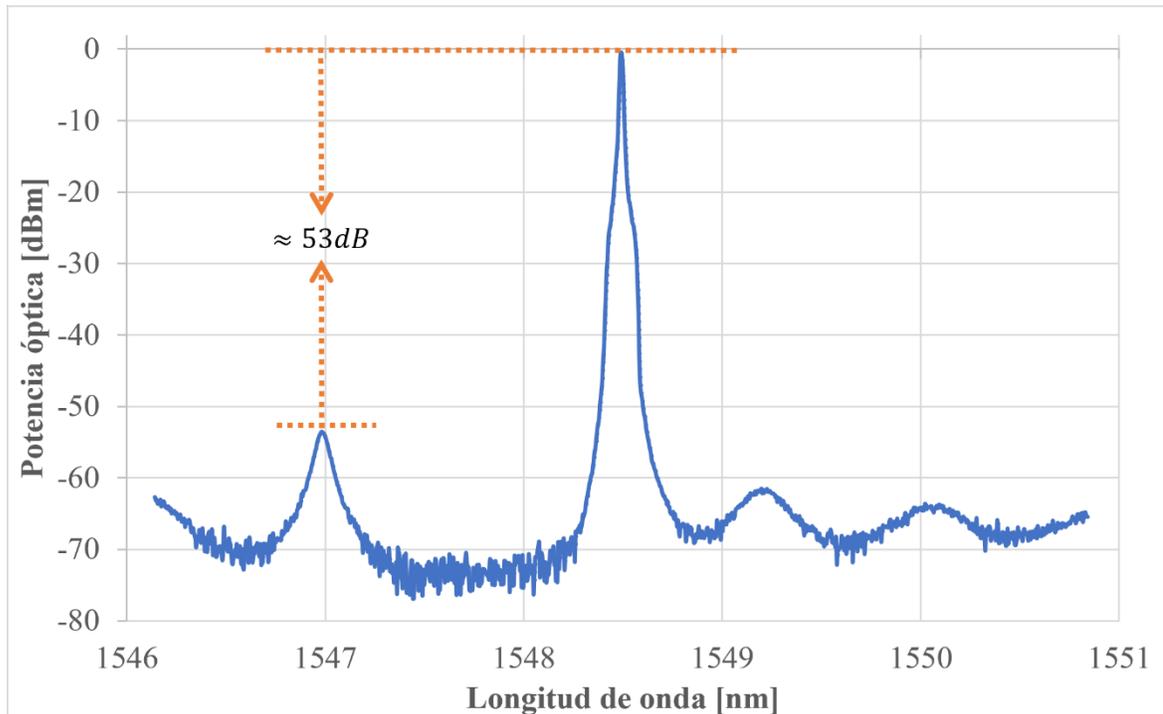


Figura 3-5.: Caracterización del láser FITEL: longitud de onda vs potencia óptica, con una corriente de polarización de 40mA a 25°C.

3.2.2 Modulador Mach-Zehnder (MZM)

El MZM utilizado es de referencia iXblue MX-LN-20 [67]. Cuenta con conectores ópticos FC/APC para la entrada y la salida de la señal óptica y su puerto RF es de tipo SMA hembra. El rango de voltaje de polarización va desde los -20V a 20V. Además, el MZM cuenta con un fotodiodo interno, en donde se puede realizar una medida de corriente.

Con el fin de ubicar el punto de cuadratura (Q) en el MZM, es necesario medir la potencia óptica a la salida del modulador en función del voltaje de polarización. Se utiliza una corriente de polarización en el láser de 25mA a 25°C. El voltaje de polarización del MZM se varía en saltos de 0,5V y se realizan variaciones en el control de polarización para lograr la máxima potencia. Gracias al puerto que incluye el MZM, también fue posible obtener la corriente en el fotodiodo. En la Figura 3-6 se presenta el esquema para caracterizar al MZM.

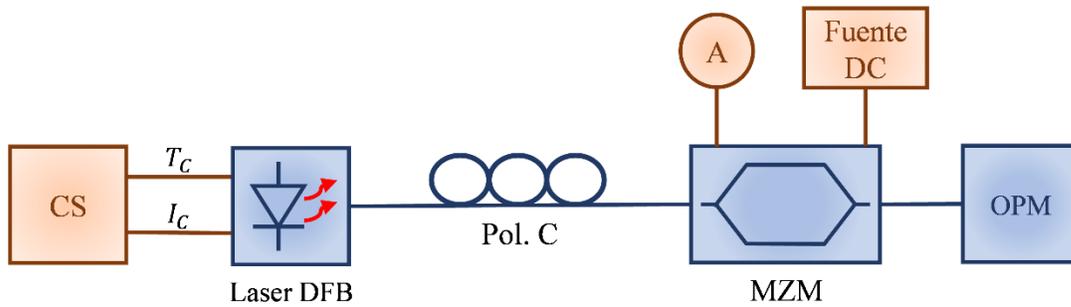


Figura 3-6.: Esquema de medidas para la caracterización del MZM.

En donde se presenta un Amperímetro (A), para obtener la corriente en el fotodiodo. En la Figura 3-7 se presentan las medidas obtenidas de potencia óptica y corriente en el fotodiodo, en función del voltaje de polarización.

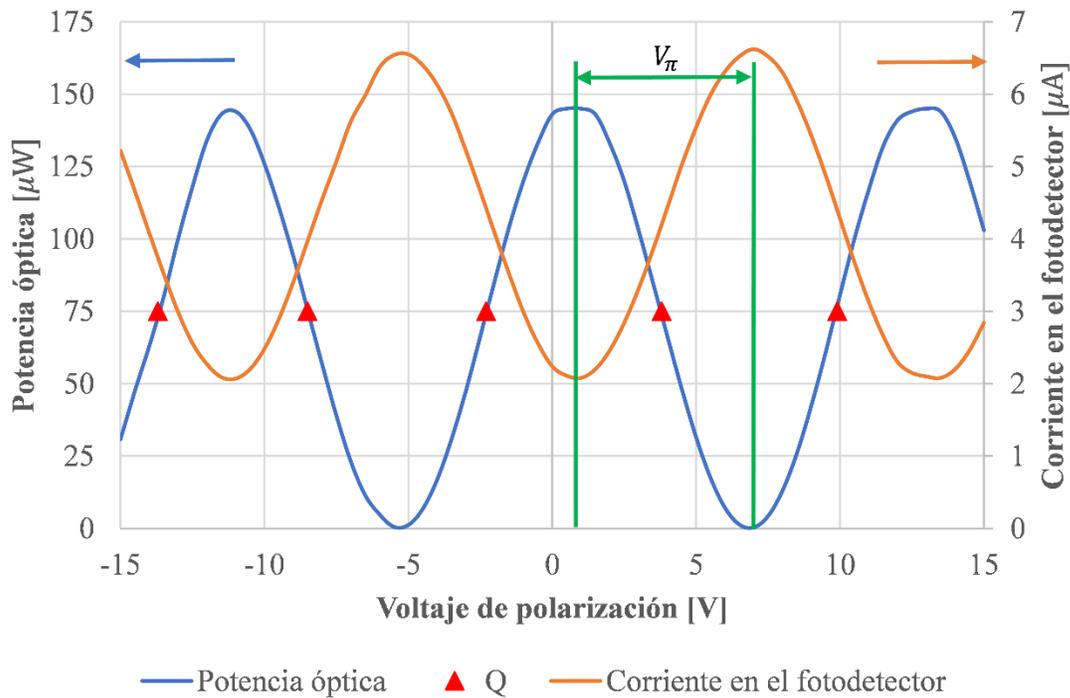


Figura 3-7.: Caracterización del MZM: potencia óptica y corriente en el fotodetector en función del voltaje de polarización. Presentando el punto Q.

El punto Q hace referencia a la polarización óptima de la señal en el MZM garantizando una eficiente amplitud de modulación óptica. Este punto se encuentra en valores cercanos a los $-8,4\text{V}$; $-2,3\text{V}$; $3,2\text{V}$ y $9,3\text{V}$. V_{π} es el voltaje de media onda del modulador (es decir el valor

de voltaje necesario para cambiar entre el punto máximo y mínimo de potencia óptica a la salida del modulador), siendo este de aproximadamente 5V.

3.2.3 Antenas

Las dos antenas utilizadas son de referencia LP0965 de la marca Ettus [68], siendo antenas direccionales con un ancho de banda de 850MHz a 6.5GHz y una ganancia de 6dBi. Mediante el uso del VNA se obtuvieron los valores del coeficiente de reflexión (S11) y de la relación de ondas estacionarias de voltaje (VSWR - *Voltage Standing Wave Ratio*), las mediciones se realizaron entorno a la frecuencia de 5,8GHz. Estas medidas se presentan en la Figura 3-8, dado que las antenas son iguales presentan medidas similares.

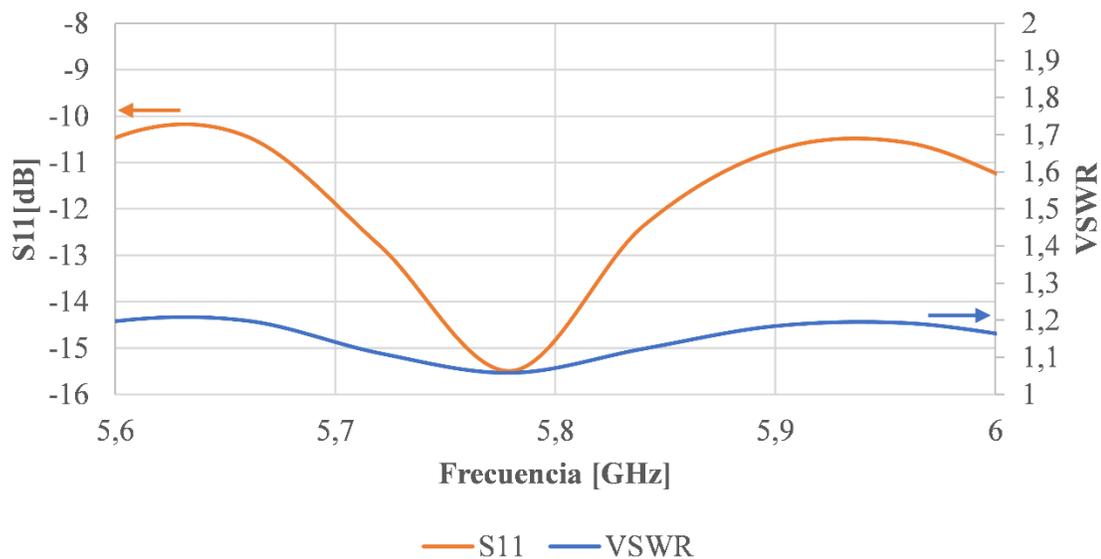


Figura 3-8.: Caracterización de antenas: S11 y VSWR en función de la frecuencia.

3.2.4 USRP, fotodetector, fibra óptica y amplificadores

Para los elementos restantes de la arquitectura planteada, los cuales son el USRP, la fibra óptica y los amplificadores, no se realizaron caracterizaciones particulares. Para el fotodetector se realizó el proceso de medición de la responsividad. En la Tabla 3-2 se presentan las principales características de estos elementos.

Elemento	Referencia	Características
USRP	Digilent Ettus B205m-i [69]	Rango de frecuencias: 70MHz a 6GHz Ancho de banda instantáneo: 56MHz Ganancia máxima: 95dBm Figura de ruido en la recepción: <8dBm Conector: SMA hembra
Fotodetector	818-BB-35F [70]	Rango de frecuencia: DC a 15GHz Rango de longitud de onda: 830nm – 1650nm Responsividad: 0,64A/W Conector de fibra: FC/UPC Conector RF: SMA hembra
Fibra óptica	Thorlabs Single Mode Optical Fiber	Dispersión: – 4,0 ps/nm·km Atenuación: 0,210 dB/km Conectores: SC/APC Longitud de 1km.
Amplificador (2)	Mini-Circuits ZX60-83LN-S+ [71]	Rango de frecuencias: 0,5 GHz a 8GHz Bajo ruido: 1,4dB Voltaje de polarización: $5V < V_p < 6V$ Ganancia de 23,6 dBm

Tabla 3-2.: Características del USRP, fotodetector, fibra óptica y amplificadores.

3.3 Metodología de trabajo para el desarrollo de las pruebas del sistema ROF

Para evaluar el desempeño de la arquitectura planteada del sistema ROF, inicialmente se realizó el diseño para una transmisión de datos a 5,8GHz en MATLAB y GNURadio, utilizando los esquemas de modulación planteados (QPSK, 16QAM y 64QAM). Estos

diseños son presentados en el Anexo B. En la Tabla 3-3 se presentan los montajes realizados durante las pruebas.

Esc. ††	Caso	Medio	Esquema
1	USRP – USRP	Coaxial	
	USRP – ESA		
2	USRP ≈ USRP	Inalámbrico	
	USRP ≈ ESA		
3	USRP → USRP	Fibra óptica	
	USRP → ESA		
4	USRP % USRP	Fibra óptica e inalámbrico (ROF)	

†† Escenario.

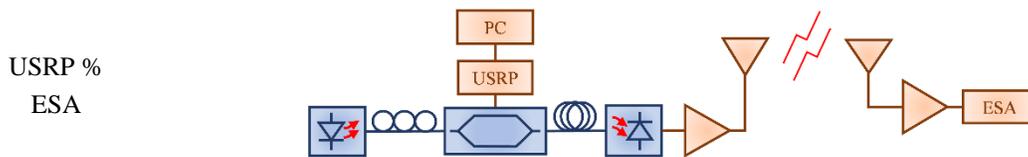


Tabla 3-3.: Metodología para las pruebas realizadas en el sistema de ROF.

En las etapas de recepción con el USRP, se realizaron envíos de imágenes de alta calidad, identificando las figuras de mérito y su posterior procesamiento. Para las etapas de recepción con el ESA, se realizaron las medidas de las figuras de mérito mediante la transmisión de un paquete aleatorio generado por el ESA y se tomaron los datos en tiempo real, especificando la tasa de adquisición de muestras.

Como un ejemplo práctico de aplicación, para la transmisión se utilizaron imágenes diagnósticas de pacientes con casos de neumonía, esto con el fin ilustrar la aplicabilidad del sistema en un posible sistema de telemedicina.

El protocolo para obtener estas medidas, el trabajo con los instrumentos y el formato de presentación, se encuentran en el Anexo C: Manejo de instrumentos y esquemas de medición.

- Para el escenario 1, con medio coaxial de 1m de longitud (–) se comprobó el funcionamiento de los diseños de software planteados y la forma de presentación de resultados en el ESA.
- En el escenario 2, con medio inalámbrico (\approx) se realizaron pruebas a 2m de distancia.
- Para el escenario 3, con medio de fibra óptica (\neg) se realizaron pruebas con una longitud en la fibra óptica de 1,5km.
- Finalmente, en el escenario 4, se revisó el funcionamiento del sistema ROF (%), realizando pruebas a una longitud fija de 1,5km de fibra óptica, variando las distancias del enlace inalámbrico y presentando una variación en la potencia del láser.

3.4 Desempeño del sistema de ROF

De acuerdo con las pruebas iniciales, se determinó el uso de un amplificador en la etapa de transmisión y uno en la etapa recepción en el escenario 2. De igual forma, estos se utilizaron para el escenario 4.

Con relación a las USRP, se estableció un valor fijo de 70 dB para la ganancia tanto en transmisión como en recepción. Este valor se determinó a través de pruebas comparativas. Al aumentar la ganancia más allá de este punto, se observa un efecto adverso que incluye distorsión y una mayor pérdida de información, lo cual sugiere que se podría estar saturando el USRP. Además, esto tiene un impacto en la relación señal-ruido (SNR), aumentando el ruido en el sistema.

La potencia óptica se fijó mediante el control de la corriente de polarización en 40mA (6,7mW). El voltaje de polarización del MZM se fijó en 9,4V. Con ayuda del control de polarización, se garantizó una potencia óptica en el fotodetector de 550 μ W.

Para abordar estas problemáticas, también se tuvo en cuenta la temperatura de la USRP. Durante las pruebas realizadas, se dejaron intervalos de tiempo entre cada una para evitar el ruido térmico y garantizar mejores mediciones.

Según los esquemas trazados en la Tabla 3-3 y la metodología planteada, en la Tabla 3-4 se presentan los resultados obtenidos para los escenarios 1, 2 y 3, con recepción en el USRP. En la Tabla 3-5 se presentan los resultados con el ESA como receptor.

Los valores medidos para el BER que están por debajo de 10^{-9} se marcan como NaN (*not a number*), ya que es el límite de medición de los instrumentos y el software implementado.

Esc	QPSK				16QAM				64QAM			
	LOG (BER)	MER (dB)	SNR (dB)	EVM (%)	LOG (BER)	MER (dB)	SNR (dB)	EVM (%)	LOG (BER)	MER (dB)	SNR (dB)	EVM (%)
1	NaN	27,88	29,99	3,18	NaN	27,88	29,99	3,18	NaN	27,88	29,99	3,18
2	NaN	23,91	24,56	5,86	-5,86	20,69	21,21	8,65	-1,88	19,04	19,43	10,85
3	NaN	24,54	25,95	5,75	NaN	20,02	22,47	7,69	-2,93	20,46	21,34	7,64

Tabla 3-4.: Resultados obtenidos para los primeros tres escenarios, receptor USRP.

Esc	QPSK				16QAM				64QAM			
	LOG (BER)	MER (dB)	SNR (dB)	EVM (%)	LOG (BER)	MER (dB)	SNR (dB)	EVM (%)	LOG (BER)	MER (dB)	SNR (dB)	EVM (%)
1	NaN	30,17	30	3,1	NaN	30,17	30	3,1	NaN	30,17	30	3,1
2	NaN	24,85	24,6	5,72	-6,66	21,08	20,9	8,83	-1,87	19,2	19	10,96
3	NaN	25,03	24,8	5,6	NaN	22,18	22,1	7,78	-2,77	21,95	19,5	7,98

Tabla 3-5.: Resultados obtenidos para los primeros tres escenarios, receptor ESA.

El primer escenario, por tener únicamente la conexión física coaxial de alta calidad y baja interferencia es la base inicial y el que mejor resultado en cuanto figuras de mérito tiene. La longitud del medio es de 1m.

En el segundo escenario, se presentaron desafíos adicionales incluyendo la interferencia de otras señales inalámbricas, obstáculos físicos, la presencia del ruido gaussiano blanco (AWGN), entre otros. Se destaca que la señal inalámbrica experimenta desvanecimiento debido a la reflexión, difracción y dispersión con elementos del entorno, generando múltiples copias de la señal, que llegan al receptor con diferentes fases y amplitudes, lo que puede provocar cancelaciones o superposiciones destructivas de la señal y afectar su calidad. Debido a la corta longitud de onda de la frecuencia utilizada (5,8GHz), las ondas son más susceptibles a este efecto de desvanecimiento por trayectorias múltiples.

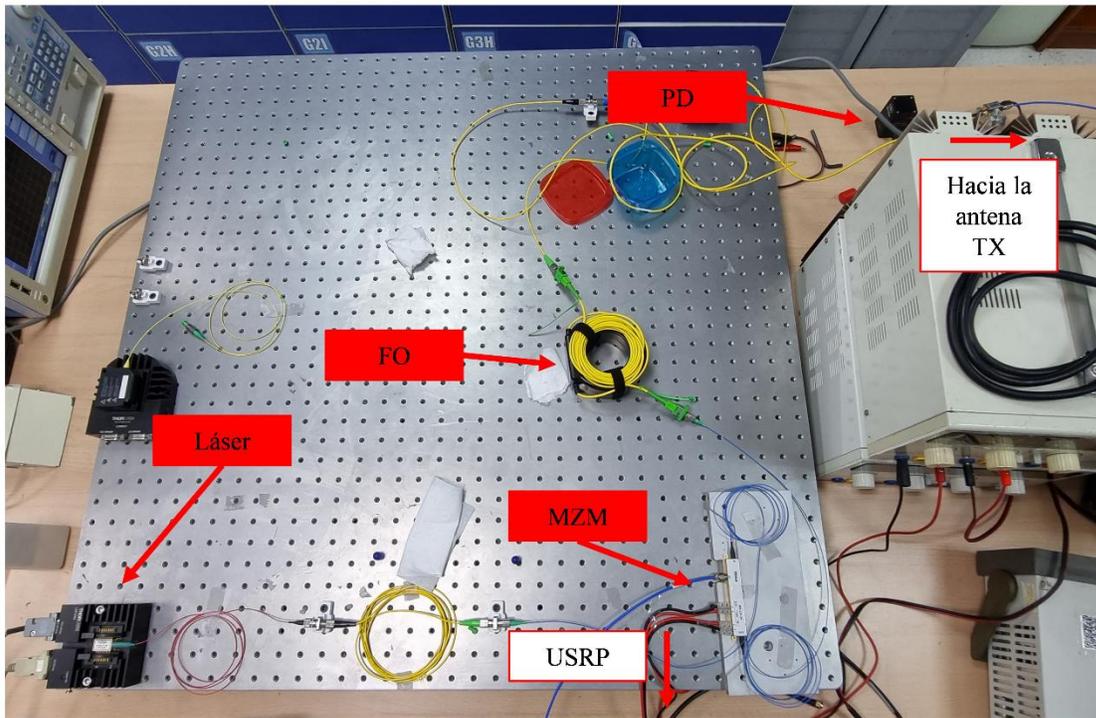
En el tercer escenario, la transmisión se enfrentó a diversos desafíos inherentes a las redes de fibra óptica. Estos, incluyen problemas como la pérdida de señal debido a las pérdidas por inserción, la degradación en la calidad de la señal RF debido a las pérdidas por retorno, la variación de frecuencia, así como los efectos de la dispersión cromática, entre otros.

Estas medidas iniciales proporcionaron información que permite anticipar y tomar un punto de referencia de lo que ocurrirá en el escenario 4.

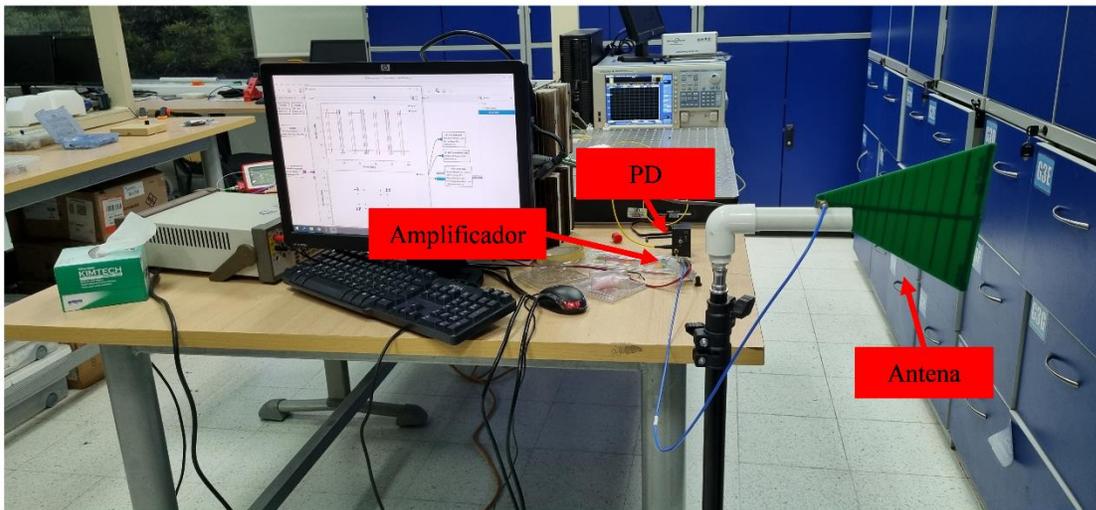
Para el escenario 4, en la Figura 3-9 se presenta el montaje del sistema ROF en transmisión, y en la Figura 3-10 se presenta el montaje del sistema en recepción.

En la Figura 3-10 a) se puede detallar el ESA en funcionamiento para una transmisión QPSK.

Las figuras presentadas revelan que el escenario de pruebas en el laboratorio no es ideal para experimentos de RF en altas frecuencias, especialmente debido al mencionado efecto de trayectorias múltiples. Sin embargo, esta configuración proporciona una reproducción realista del entorno de operación, lo que permite evaluar el rendimiento del sistema en condiciones desafiantes y obtener resultados y conclusiones en situaciones adversas.



a)



b)

Figura 3-9.: Montaje del sistema ROF en transmisión.

En a) se presentan el láser, el MZM, la FO y el PD. En b) se presentan el PD, el amplificador y la antena.

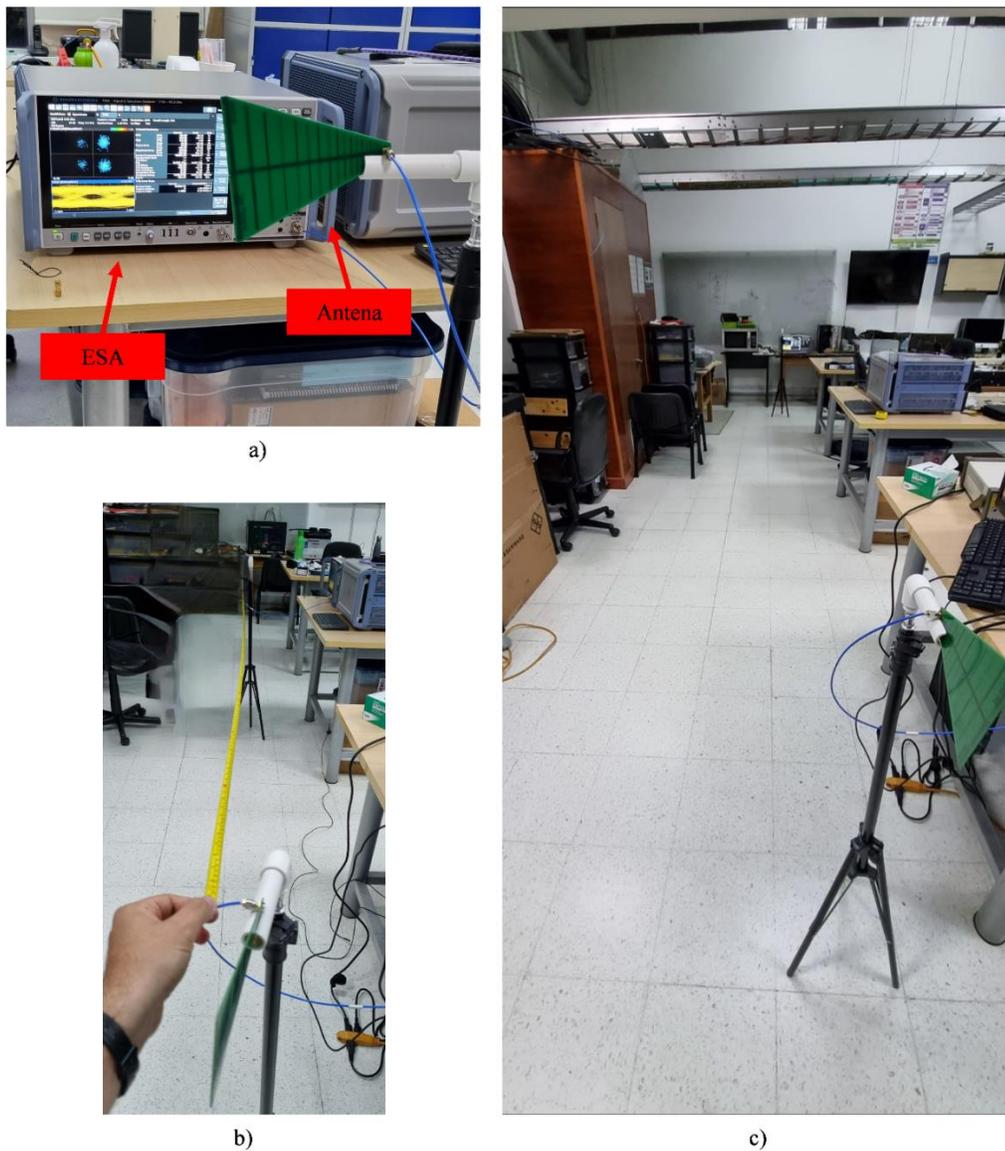


Figura 3-10.: Montaje del sistema ROF en recepción.

En a) se presenta la antena y el ESA. En b) se presenta el montaje, tomando medidas de distancia aproximada (3m) y en c) una imagen de referencia del sistema en funcionamiento a 6m.

En los resultados para los escenarios con recepción con el USRP, se pueden visualizar los diagramas de constelación y comparar las figuras transmitidas. El formato de las imágenes es BMP con un peso de 8.17MB. En la Figura 3-11 se observa una muestra de las figuras de

diagramas de constelación obtenidas para los resultados entre USRP, donde: a) QPSK a 6m, b) 16QAM a 3m, c) 64QAM a 1m.

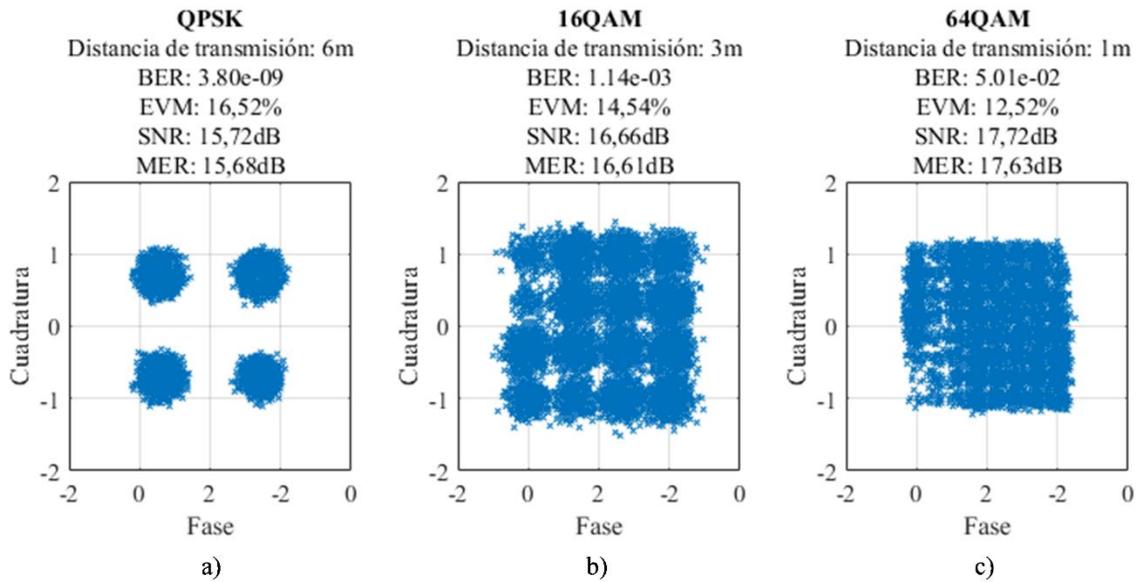


Figura 3-11.: Muestra de resultados obtenidos para transmisión USRP-USRP.

Se puede observar, especialmente para los casos de 16QAM y 64QAM que algunos símbolos presentan una menor densidad, esto puede ser debido a la variación de bits transmitidos por símbolo; la disminución del SNR y los efectos del canal, que provocan una mayor dispersión en los símbolos; o una posible saturación en recepción del USRP.

A continuación, en la Figura 3-12 se presenta una muestra del resultado de una transmisión de una imagen en 64QAM a 3 metros de distancia.

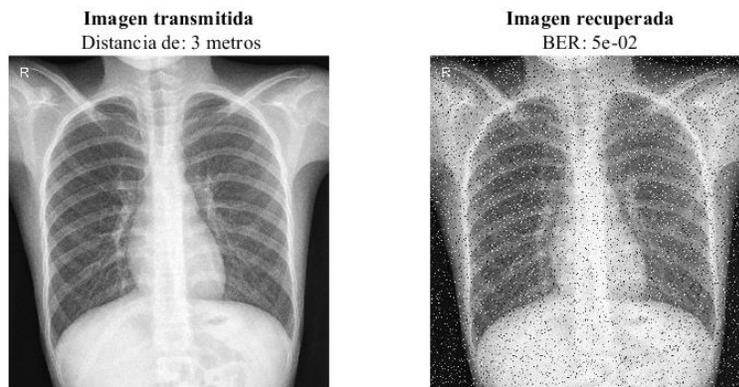


Figura 3-12.: Imagen transmitida vs imagen recuperada: 64QAM a 3 metros.

Se observa en la imagen recuperada, los evidentes cambios con la imagen original, lo que se interpreta como errores en la transmisión, viéndose reflejado en el valor del BER asociado. Se tomaron cinco medidas por prueba, estos resultados se pueden observar en el Anexo D: Resultados de pruebas en Radio sobre Fibra, en las tablas: Tabla A-6-1, Tabla A-6-2 y Tabla A-6-3.

En la Figura 3-13 se observan los resultados obtenidos, comparándolos con las gráficas de relación de la Figura 2-8, donde las líneas representan las curvas teóricas planteadas, los cuadros representan los resultados para QPSK, los rombos los resultados para 16QAM y los triángulos los resultados para 64QAM.

Para la Figura 3-13 a), se presenta la relación entre el EVM y el LOG(BER), recordando que entre más bajo sea el valor de EVM, mejor es la calidad de la señal, y entre menores sean los valores de LOG(BER), menos errores presentará la transmisión. Esto permite validar que, entre una mayor distancia de transmisión, menor será la calidad de la señal recibida.

En la Figura 3-13 b), se presenta la relación entre el SNR y el LOG(BER), mostrando que para valores más grandes de SNR, mejor será la calidad de la señal transmitida.

Se valida la relación entre EVM y el BER, así como también la relación entre el SNR y el BER, a pesar de las condiciones del canal inalámbrico. La potencia óptica en el fotodetector presentó variaciones con un punto mínimo de $525\mu\text{W}$ y un máximo de $570\mu\text{W}$, sin observar cambios relevantes entre los esquemas de modulación.

Durante estas pruebas, se pudo constatar que en el caso de la modulación QPSK, se cumplieron los límites establecidos para SNR, con valores superiores al límite de los 9dB; para EVM, con valores inferiores al límite del 17%; y para el BER, con valores menores al límite de 10^{-3} . Los valores obtenidos para las medidas de 1m y 3m, presentan un valor NaN para el BER, por lo que no alcanzan a ser representados en la figura presentada.

Al considerar la modulación 16QAM, se observa que para el SNR se alcanza a superar el límite establecido de 13dB. Sin embargo, para el EVM no se alcanza a cubrir el límite de 12% en las transmisiones de 6 metros, mientras que para el BER no se alcanza el límite establecido en 10^{-4} para las transmisiones de 3 y 6 metros.

Por último, en el caso de la modulación 64QAM, se observa que para el SNR solo en las transmisiones de 1 metro, se alcanza a superar el límite de 16dB. Para el EVM no se alcanzó

el límite de 7% en ninguno de los 3 casos, de igual forma para el límite de 10^{-5} del BER.

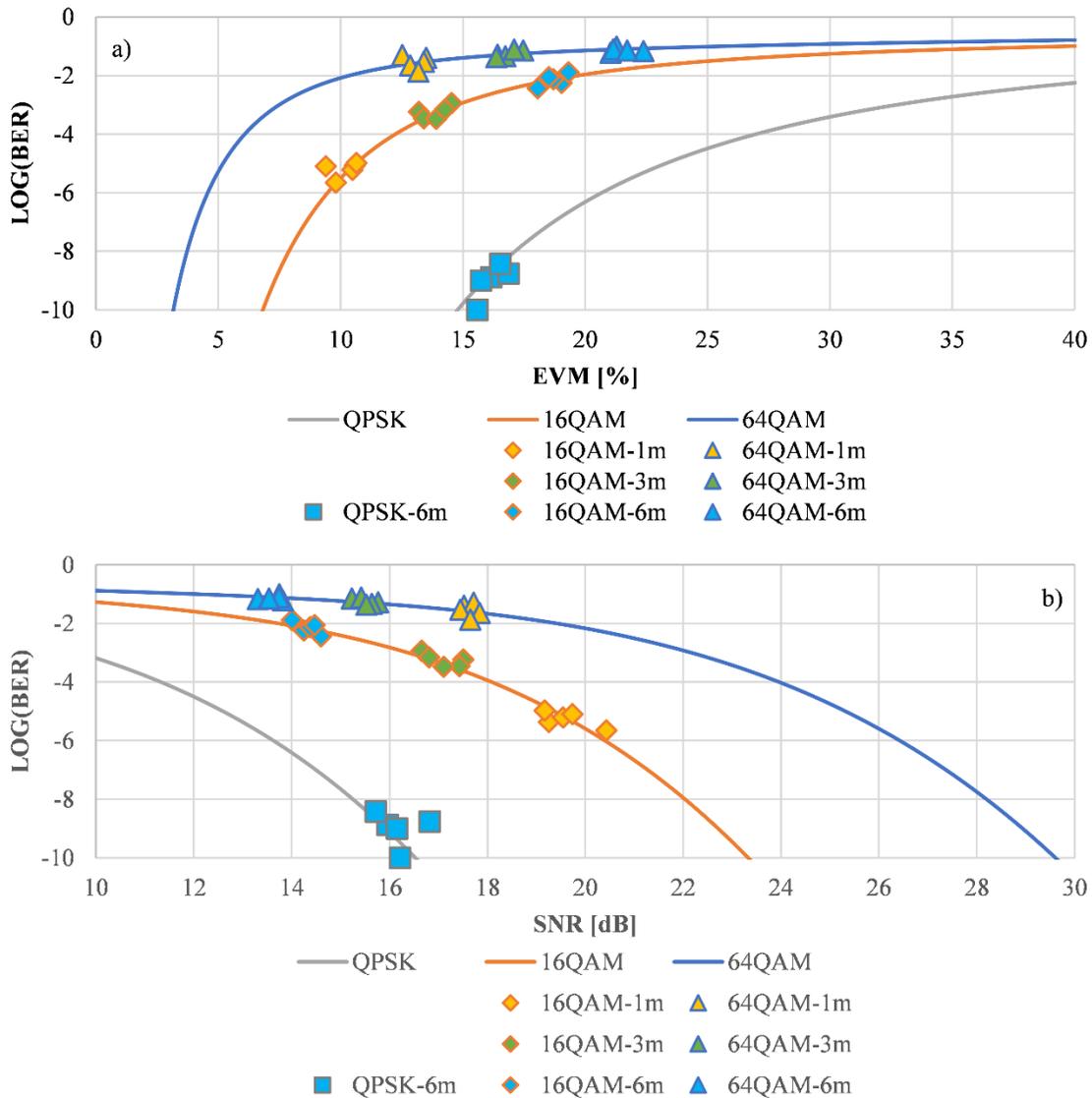


Figura 3-13.: Resultados obtenidos en EVM, SNR y BER.

Presentando en a) EVM vs BER y en b) SNR vs BER.

Para el último escenario realizando pruebas hacia el ESA, es necesario considerar la complejidad para calcular el BER, ya que es necesario sincronizar la secuencia binaria enviada originalmente con la señal recibida. Utilizando la herramienta incluida en el ESA, se crea un archivo de aproximadamente 8,6MB (similar a la foto transmitida). Se realizaron 50 muestras durante las pruebas con cada modulación.

En la Tabla 3-6 se presentan los promedios y desviaciones de los resultados obtenidos para las pruebas a una distancia de 1 metro. Los resultados totales se pueden encontrar en la Tabla A-6-4. Donde se observa que para QPSK se cumplen los límites establecidos. Para 16QAM, los límites de SNR y EVM son alcanzados, mientras que para el LOG(BER) se obtienen valores promediados de -4.86 , que se encuentra por encima del límite, pero se considera un valor aceptable. Finalmente, para 64QAM se cumple el límite de SNR, pero no para los valores de EVM sobrepasando el límite por casi 5% y para el BER obteniendo valores cercanos a 10^{-3} , siendo 10^{-5} el límite establecido.

1m	QPSK				16QAM				64QAM			
	LOG BER	MER (dB)	SNR (dB)	EVM (%)	LOG BER	MER (dB)	SNR (dB)	EVM (%)	LOG BER	MER (dB)	SNR (dB)	EVM (%)
\bar{X}	NaN	23,52	23,97	6,39	-4,86	19,27	19,75	10,32	-2,96	16,84	17,37	13,57
σ	NaN	1,26	1,19	0,89	0,51	0,82	0,74	0,89	0,59	0,7	0,58	0,91

Tabla 3-6.: Promedio y desviación estándar de figuras de mérito, distancia de 1 metro, receptor ESA.

De igual forma, en la Tabla 3-7 se presenta el resumen de los resultados obtenidos durante las pruebas a una distancia de 3 metros. Los resultados totales se pueden encontrar en el Anexo D en la Tabla A-6-5. Los resultados obtenidos para QPSK, indican el cumplimiento de los límites establecidos. Para 16QAM, se cumple el límite de SNR, se sobrepasa por aproximadamente el 0,5% el de EVM y no se alcanza a cumplir el límite del BER. Finalmente, para 64QAM, no se alcanzan a cumplir los límites establecidos.

3m	QPSK				16QAM				64QAM			
	LOG BER	MER (dB)	SNR (dB)	EVM (%)	LOG BER	MER (dB)	SNR (dB)	EVM (%)	LOG BER	MER (dB)	SNR (dB)	EVM (%)
\bar{X}	NaN	19,35	19,90	10,18	-3,50	16,28	16,78	14,51	-1,49	14,4	14,91	17,99
σ	NaN	1,10	1,00	1,15	0,86	0,61	0,51	0,85	0,28	0,50	0,50	1,03

Tabla 3-7.: Promedio y desviación estándar de figuras de mérito, distancia de 3 metros, receptor ESA.

Finalmente, para las pruebas de 6 metros, se presenta el resumen de los resultados obtenidos en la Tabla 3-8 y los resultados totales en el Anexo D en la Tabla A-6-6. Nuevamente para los resultados de QPSK, se cumplen los límites establecidos. Para 16QAM, se alcanza a cumplir el límite de SNR, mientras que los límites de EVM y BER no se alcanzaron. Para 64QAM, no se cumplen los límites indicados.

6m	QPSK				16QAM				64QAM			
	LOG BER	MER (dB)	SNR (dB)	EVM (%)	LOG BER	MER (dB)	SNR (dB)	EVM (%)	LOG BER	MER (dB)	SNR (dB)	EVM (%)
\bar{X}	-8,62	15,56	16,08	15,74	-1,95	13,65	14,14	19,66	-1,08	12,36	12,90	22,68
σ	0,33	0,72	0,64	1,16	0,62	0,46	0,39	0,87	0,47	0,55	0,44	1,15

Tabla 3-8.: Promedio y desviación estándar de figuras de mérito, distancia de 6 metros, receptor ESA.

De manera general se puede observar que en todos los casos el MER siempre presenta valores ligeramente inferiores al SNR, estableciendo una relación directa entre ambas métricas. En la Figura 3-14 se presenta una muestra de la comparación entre el SNR y el MER, utilizando una modulación 16QAM en una distancia de transmisión de 3 metros. Se

observa la línea de tendencia que refleja la relación consistente entre estas dos figuras de mérito, corroborando su vinculación.

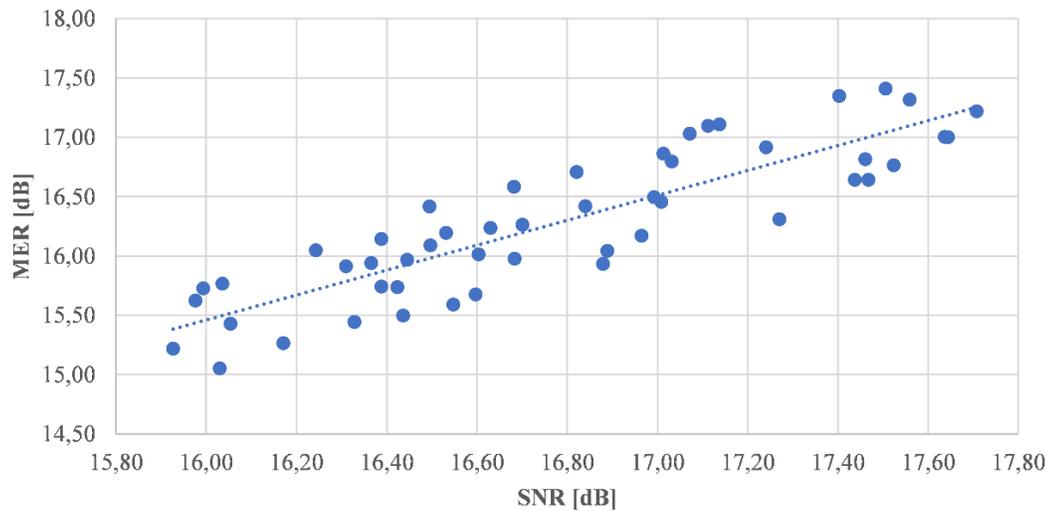


Figura 3-14.: Relación entre el SNR y el MER, en una modulación 16QAM a 3 metros de distancia.

En la Figura 3-15 se presenta una muestra del espectro recibido para una transmisión en 64QAM a una distancia de 3 metros.

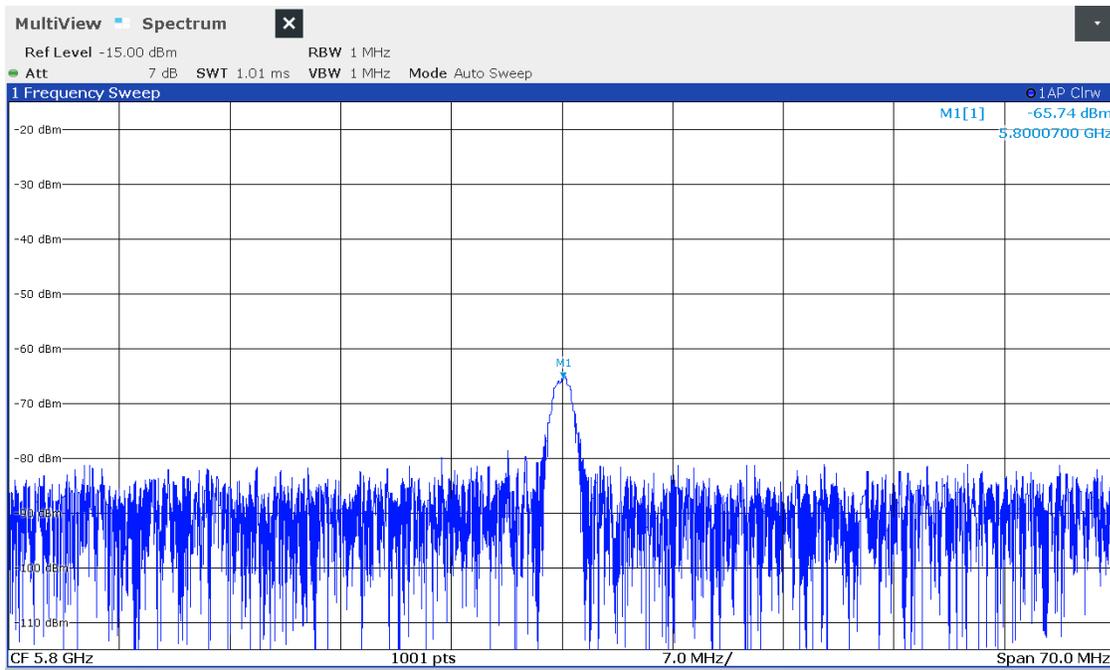


Figura 3-15.: Espectro recibido en 64QAM a 3 metros de distancia.

En la Figura 3-16 se presenta una muestra de los resultados obtenidos en el ESA para una transmisión QPSK a una distancia de 1 metro.

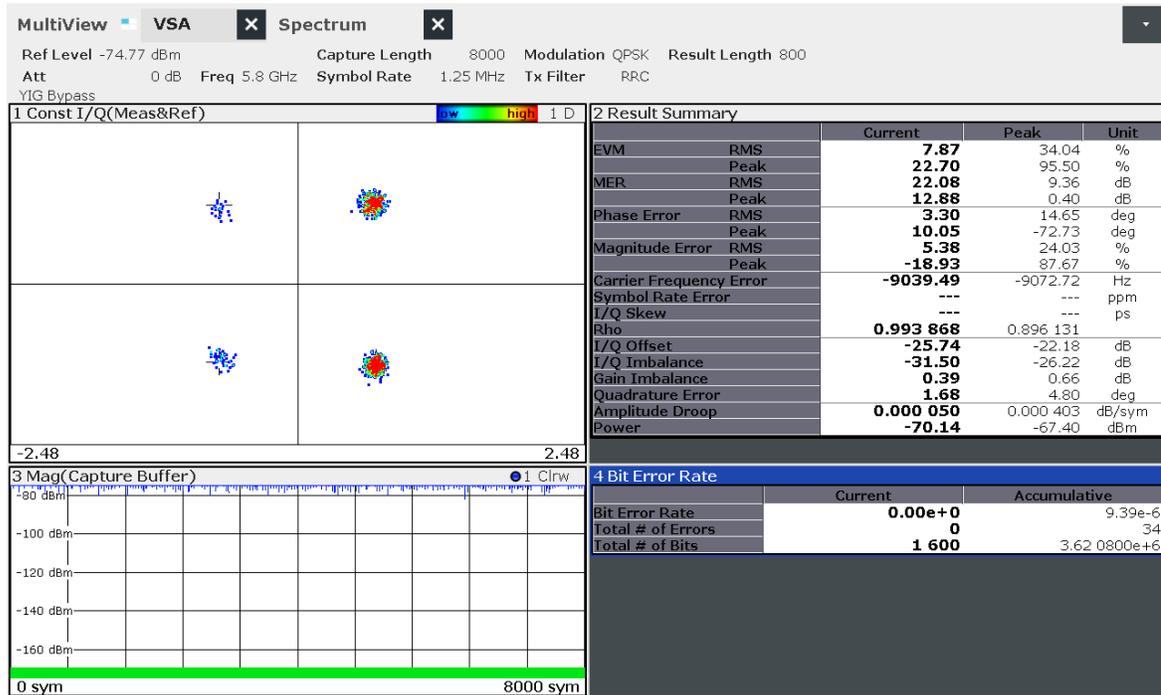


Figura 3-16.: Resultados obtenidos para QPSK a una distancia de 1 metro.

Durante las mediciones con el USRP, se observa que los resultados son viables en comparación con los obtenidos del ESA, su relación no varía notablemente con los obtenidos anteriormente, donde se concluye la relación directa entre el EVM y el MER mediante la Ecuación (3-1).

$$MER = -20 \log_{10}(EVM_{lin}) \quad (3-1)$$

Donde $EVM_{lin} = EVM[\%]/100$.

De acuerdo con esta ecuación, se puede trazar una relación entre el EVM y el SNR, donde será un valor ligeramente superior al calculado en el MER, y de acuerdo con el modelo planteado en la Figura 2-8 se puede presentar una aproximación del BER a partir del SNR o el EVM. Esto será presentado en el Capítulo 5.

Finalmente, se observa un mejor rendimiento del sistema aumentando la potencia óptica del láser, no obstante mantener un rango operativo superior al establecido, puede afectar algún componente dentro de la arquitectura propuesta. Sin embargo, durante una prueba realizada

se puede observar una notable mejora para la modulación 64QAM. Estos casos serán estudiados en el Capítulo 5.

En la Figura 3-17 se observan los resultados para una transmisión de 64QAM a 3 metros de distancia, con receptor USRP. Para esta prueba se garantizó una potencia óptica máxima de 1,2mW en el PD.

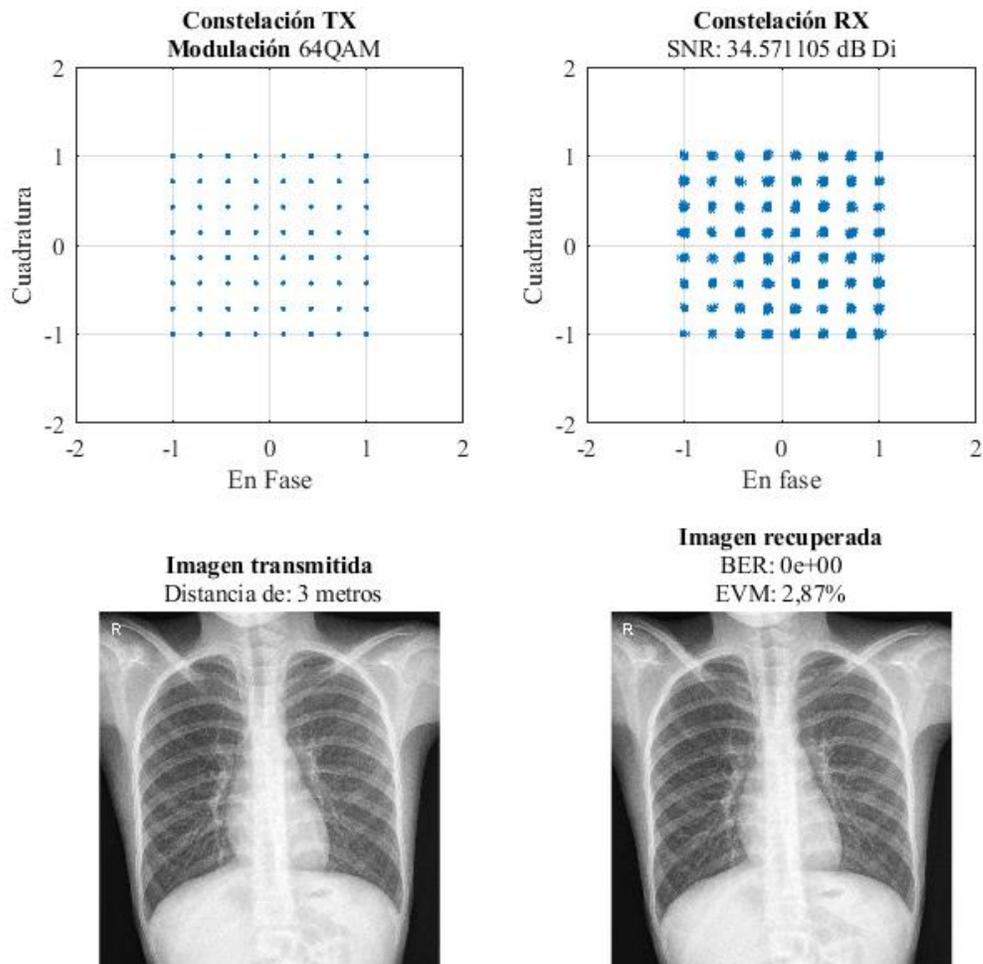


Figura 3-17.: Prueba de transmisión a 64QAM, 3 metros de distancia, aumentando la potencia óptica.

4. Caracterización del oscilador optoelectrónico (OEO)

Este capítulo está dividido en cuatro partes, en donde se presenta el modelo del OEO implementado, la caracterización de los componentes del OEO, la metodología de trabajo y los resultados obtenidos.

4.1 Arquitectura del OEO

Con el fin de evaluar el desempeño del OEO, haciendo uso de los recursos disponibles y considerando los esquemas propuestos, en la Figura 4-1 se presenta la arquitectura específica propuesta para el OEO.

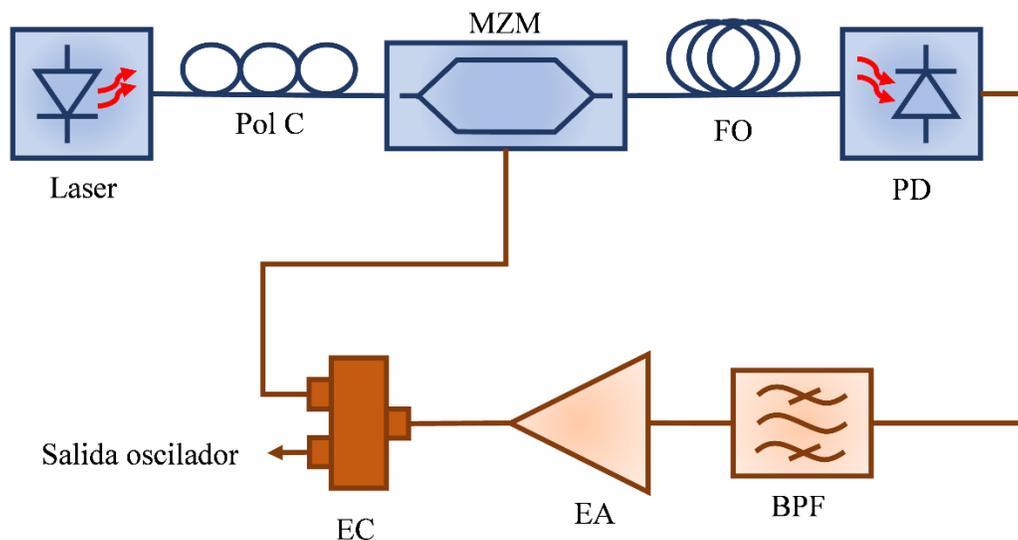


Figura 4-1.: Arquitectura del OEO planteada.

El láser se encarga de generar una señal óptica transmitida a través de un control de polarización (Pol C), el modulador Mach-Zehnder (MZM) y una línea de retardo óptico (FO), esta luz emitida es detectada por el fotodetector (PD) y convertida en una señal

eléctrica. Esta señal se filtra (BPF) en la frecuencia de funcionamiento del OEO y se amplifica (EA), para modular la señal óptica por medio del MZM. Este bucle mantiene la oscilación, permitiendo la salida de una señal eléctrica estable haciendo uso de un acoplador eléctrico (*EC – electrical coupler*).

De acuerdo con lo presentado en el Capítulo 2, este OEO utiliza un esquema de modulación externo.

4.2 Caracterización de componentes

De acuerdo con la arquitectura planteada en la Figura 4-1 se presenta la caracterización de los elementos que componen el OEO. De igual forma que en el capítulo anterior, se utilizan los instrumentos de medición presentados en la Tabla 3-1.

A continuación, se presenta la caracterización de los elementos presentes en la arquitectura propuesta:

4.2.1 Fuente láser

El láser utilizado como fuente óptica es de referencia Thorlabs LP1550-SAD2 [72], con conector óptico FC/APC. Es un láser tipo DFB con longitud de onda central cercana a los 1550nm.

Se utiliza el esquema presentado en la Figura 3-2 para obtener la potencia óptica en función de la corriente de polarización. Se aplicó una corriente de polarización en un rango de 5mA a 30mA en intervalos de 3mA, variando la temperatura de 20°C a 30°C en intervalos de 5°C.

En la Figura 4-2 se presentan las potencias ópticas del láser, obtenidas en función de la corriente de polarización y la temperatura. Las mediciones realizadas indican que la corriente de polarización umbral se sitúa en torno a los 5mA y la eficiencia de la pendiente del láser es de 0,152W/A.

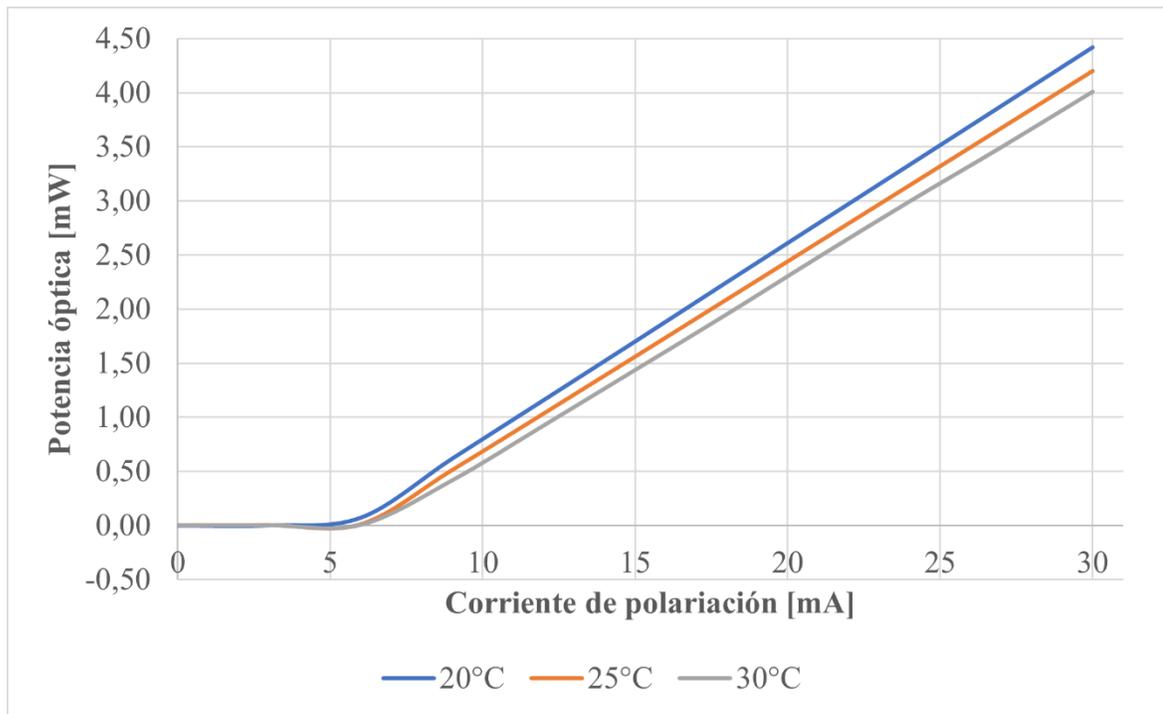


Figura 4-2.: Caracterización del láser Thorlabs: corriente de polarización vs potencia óptica del láser DFB para diferentes temperaturas.

Nuevamente, se toma como referencia la Figura 3-2, sustituyendo el OPM por el OSA y aplicando las mismas variaciones en la corriente de polarización y la temperatura del láser, se logra obtener la longitud de onda central del láser. En la Figura 4-3 se presentan las diferentes longitudes de onda centrales del láser, obtenidas en función de la corriente de polarización y temperatura.

Finalmente, en la Figura 4-4 se presenta el espectro del láser, utilizando el montaje modificado de la Figura 3-2 y tomando como referencia una corriente de polarización de 27mA a 25°C. En esta Figura se puede apreciar que la supresión del modo lateral alcanza los 56 dB, superando el umbral de los 30 dB, indicando que se trata de un láser monomodo.

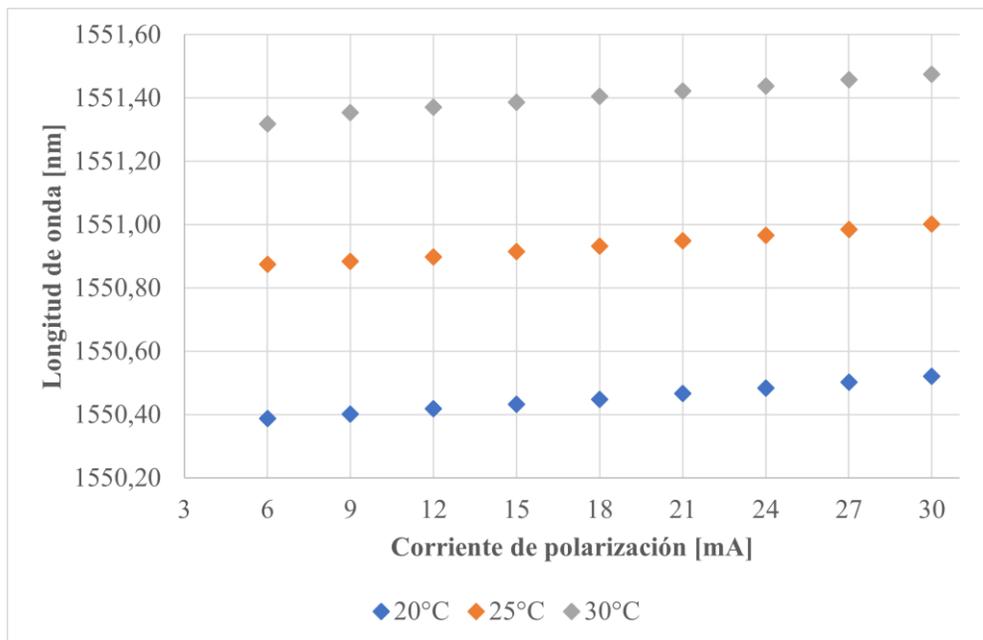


Figura 4-3.: Caracterización del láser Thorlabs: evolución de las longitudes de onda en función de la corriente de polarización.



Figura 4-4.: Caracterización del láser Thorlabs: longitud de onda vs potencia óptica, con una corriente de polarización de 27mA a 25°C.

4.2.2 Fotodetector (PD)

El PD utilizado es de referencia Newport high-speed detector modelo 1414 [73]. Su rango de longitud de onda detectable va desde los 500nm a los 1630nm, con un ancho de banda de hasta 25GHz. Su puerto óptico se satura a 2mW, con entrada para conectores FC/PC de fibras monomodo. Su puerto SMA es macho a 50Ω y cuenta con un monitor de la ganancia de polarización.

Para poder encontrar la eficiencia con la que el fotodetector convierte la señal óptica incidente, en una señal eléctrica (responsividad), en la Figura 4-5 se presenta el esquema para medir la responsividad del PD.

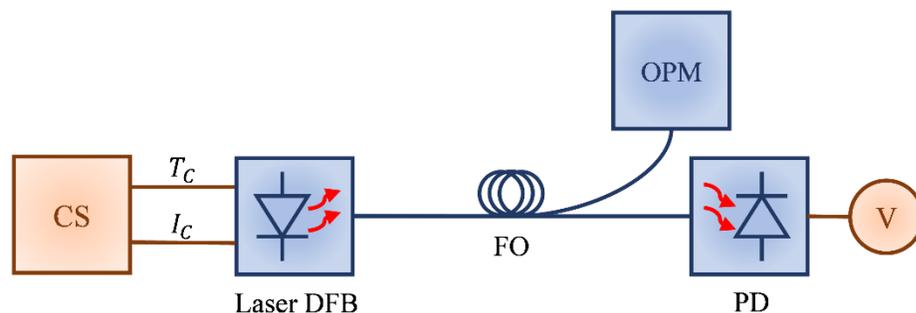


Figura 4-5.: Esquema para la caracterización del PD.

En donde se presenta un Voltímetro (V) para obtener el voltaje en el fotodetector y el uso de un splitter óptico con relación 50/50. El fabricante indica la relación entre el voltaje detectado y la corriente en el fotodetector es de $1\text{mV}/1\mu\text{A}$.

En la Figura 4-6 se presentan las medidas obtenidas para la responsividad del PD, indicando un valor cercano a los $0,399\text{ A/W}$.

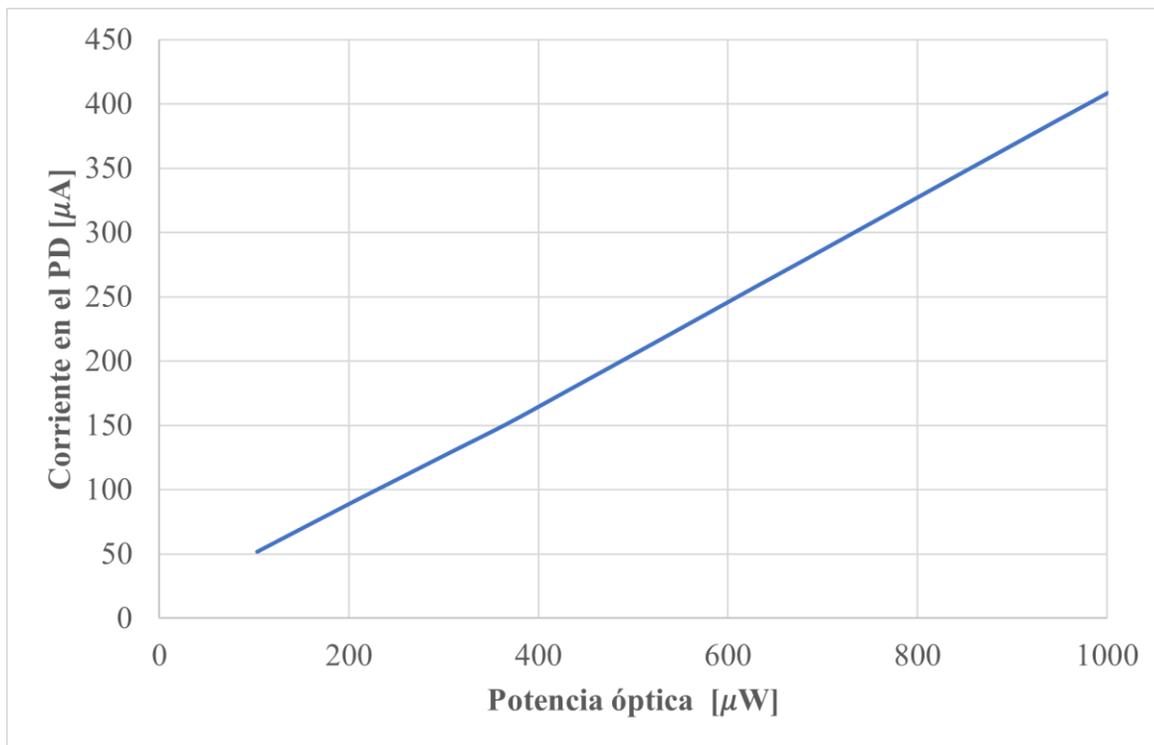


Figura 4-6.: Caracterización del PD Newport: responsividad dada la potencia óptica vs la corriente en el fotodetector.

4.2.3 Filtro pasa banda

El filtro pasa banda utilizado es de referencia Mini-Circuits ZBP-5800-S+ [74], con un ancho de banda de 150MHz, de los 5725MHz a 5825MHz. Cuenta con dos conectores SMA hembra. En la Figura 4-7 se presentan los parámetros S11 y S21 del filtro, medidos con el VNA con una potencia de entrada de 0dBm. Esta gráfica indica un S11 por debajo de -25dB garantizando una baja cantidad de energía reflejada y una alta eficiencia en la transmisión del OEO.

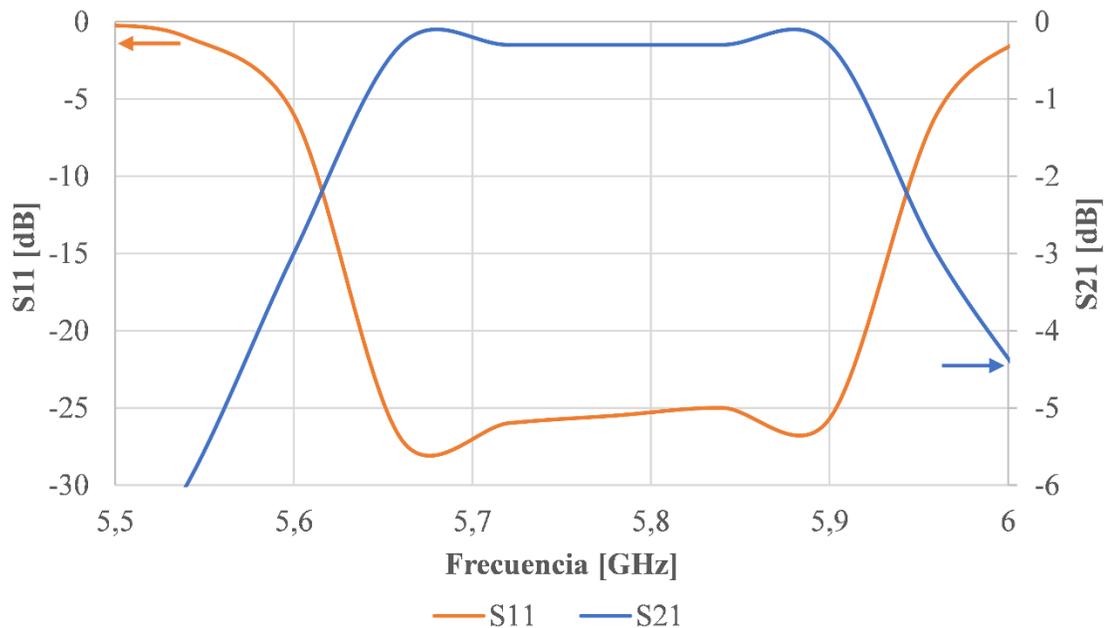


Figura 4-7.: Caracterización del filtro: parámetros S11 y S21.

4.2.4 Modulador Mach Zehnder, fibra óptica, amplificadores y acoplador eléctrico

Para los elementos restantes de la arquitectura planteada, los cuales son el modulador Mach Zehnder, la fibra óptica, los amplificadores y el acoplador eléctrico, no se realizaron caracterizaciones particulares. Sin embargo, en la Tabla 4-1 se presentan las principales características de estos elementos.

En el caso del MZM, se realiza el mismo proceso descrito en la sección 3.2.2 para ubicar el punto Q en el MZM. Se utiliza una corriente de polarización en el láser de 27mA a 25°C, se varía el voltaje de polarización del MZM en saltos de 0,5V y se realizan variaciones en el control de polarización para lograr la máxima potencia. Se utiliza el esquema presentado en la Figura 3-6 y se obtiene un resultado similar al presentado en la Figura 3-7.

Elemento	Referencia	Características
Modulador Mach Zehnder [75]	MXAN-LN-20	Conectores: FC/APC Conector RF: SMA hembra Rango de polarización: -20V a 20V
Fibra óptica	Thorlabs Single Mode Optical Fiber	Dispersión: - 4,0 ps/nm·km Atenuación: 0,210 dB/km Conectores: SC/APC Longitud de 500m y 1km. $n_F = 1.47$
Amplificador (2) [76]	Mini-Circuits ZX60-83LN-S+	Rango de frecuencias: 0,5 GHz a 8GHz Bajo ruido: 1,4dB Voltaje de polarización: $5V < V_p < 6V$ Ganancia de 23,6 dBm
Acoplador eléctrico (EC) [77]	Mini-Circuits ZUDC20-02183-S+	Rango de frecuencias: 2GHz a 18GHz Conectores RF: SMA hembra

Tabla 4-1.: Características del modulador Mach-Zehnder, la fibra óptica, los amplificadores y el acoplador eléctrico.

4.3 Metodología de trabajo para las pruebas del OEO

Para evaluar el desempeño del OEO, inicialmente se realiza una medición en lazo abierto para conocer la ganancia necesaria para cumplir con el criterio de Barkhausen (determinando la amplificación necesaria).

Posteriormente se realiza el montaje del OEO como se presenta en la Figura 4-1, en donde se visualiza el espectro del OEO y su ruido de fase, detallando los modos y el FSR, con diferentes longitudes en la línea de retardo (FO). Se utilizan líneas de retardo (FO) de 500m, 1km, 1,5km y 2km. Finalmente se mide la estabilidad del OEO durante un periodo de 2 horas, utilizando una FO de 1.5km.

4.4 Desempeño del OEO

Con el fin de asegurar la oscilación y cumplir con el criterio de Barkhausen, se lleva a cabo una medición en lazo abierto del sistema, lo cual, adicionalmente, permite analizar la respuesta en frecuencia del OEO. En la Figura 4-8 se presenta el esquema de medición en lazo abierto.

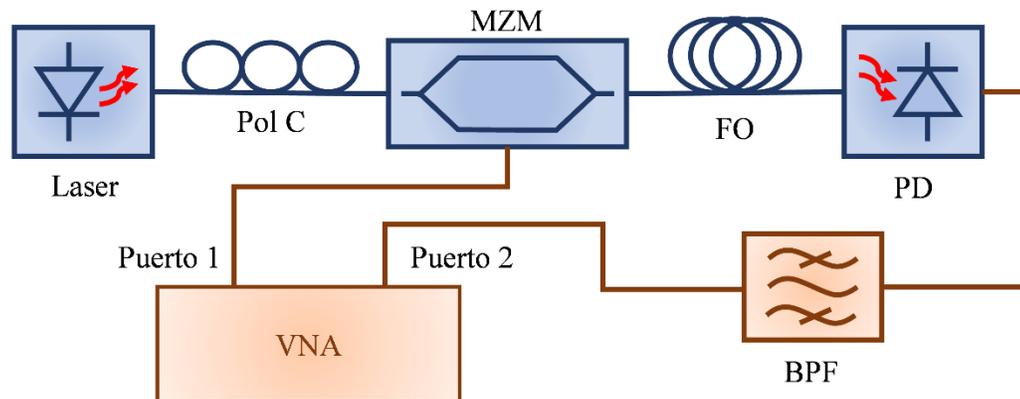


Figura 4-8.: Esquema de medición en lazo abierto.

Los parámetros de caracterización para las pruebas de lazo abierto se establecen garantizando el máximo desempeño posible, en donde la corriente de polarización del láser es de 30mA a una temperatura de 20°C, el punto Q del MZM se encuentra a 7,4V y se utiliza una FO de 1,5km.

En la Figura 4-9, se presentan las medidas obtenidas en las frecuencias cercanas a 5,8GHz, para el parámetro S_{11} se obtiene un valor cercano a los $-16dB$, lo que indica una cantidad aceptable de energía reflejada; en la carta de Smith muestra una impedancia de $60,720 - j13,161 \Omega$, lo que indica una falta de adaptación óptima de impedancias; finalmente en el parámetro S_{21} se indica una pérdida de transmisión de $-49dB$, por lo cual se deben utilizar dos amplificadores de la referencia marcada en la Tabla 4-1.

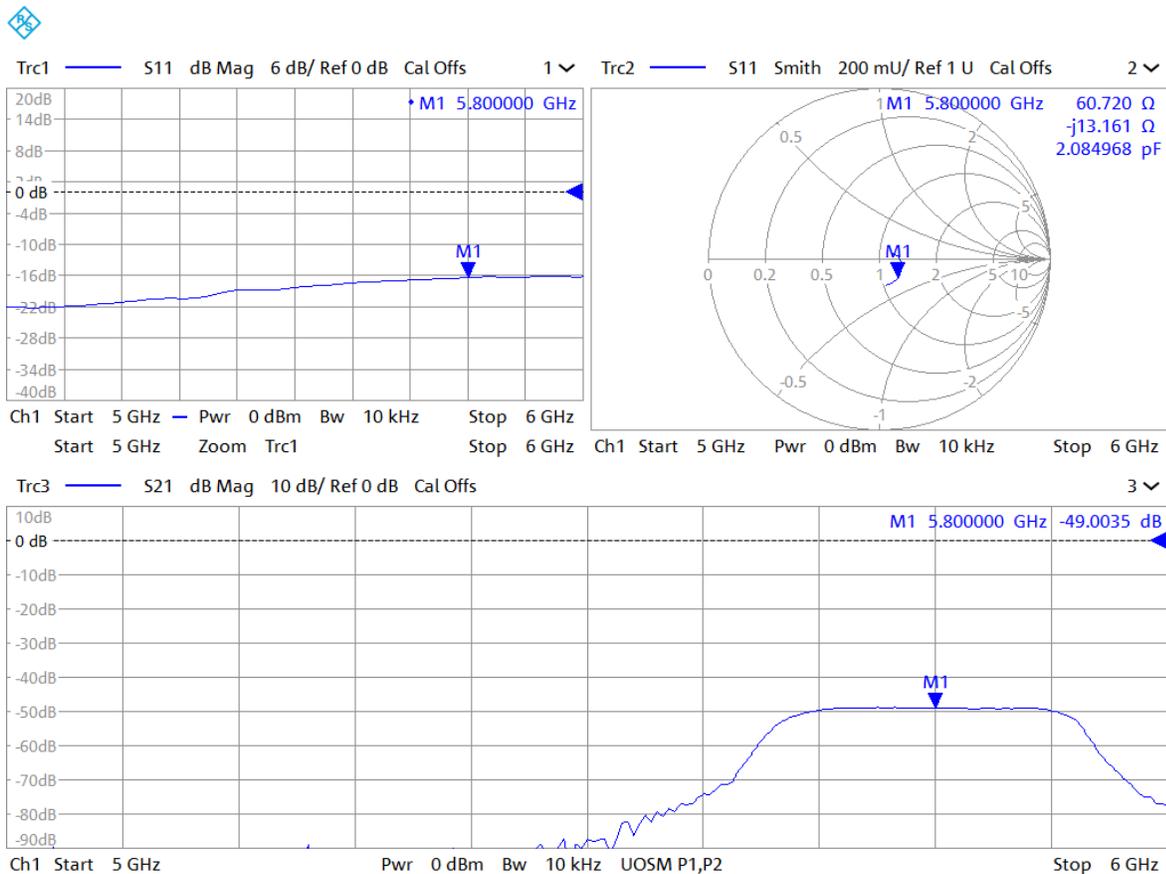


Figura 4-9.: Medidas de parámetros S11 en magnitud y carta de Smith, medida de S21 para el OEO en lazo abierto, sin etapa de amplificación.

En la Figura 4-10 se presentan las medidas obtenidas en lazo abierto incluyendo los amplificadores. Se realizaron ajustes para mejorar la transmisión, específicamente cambiando uniones y cables de conexión. Esto se ve reflejado en el parámetro S11 obteniendo una medida cercana a los -22dB y en la carta de Smith con una impedancia de $53,078 - j3,287 \Omega$, indicando una mejora en la relación de amplitud de la señal reflejada con respecto a la señal incidente y el acople de impedancias. Finalmente, en el parámetro S21 se observa un valor de ganancia en la transmisión cercano a los $-2,6816\text{dB}$. Bajo las mismas condiciones de medición, esta ganancia presentada y realizando ajustes en el control de polarización, se puede garantizar el cumplimiento del criterio de Barkhausen ($G = 0\text{dB}$).

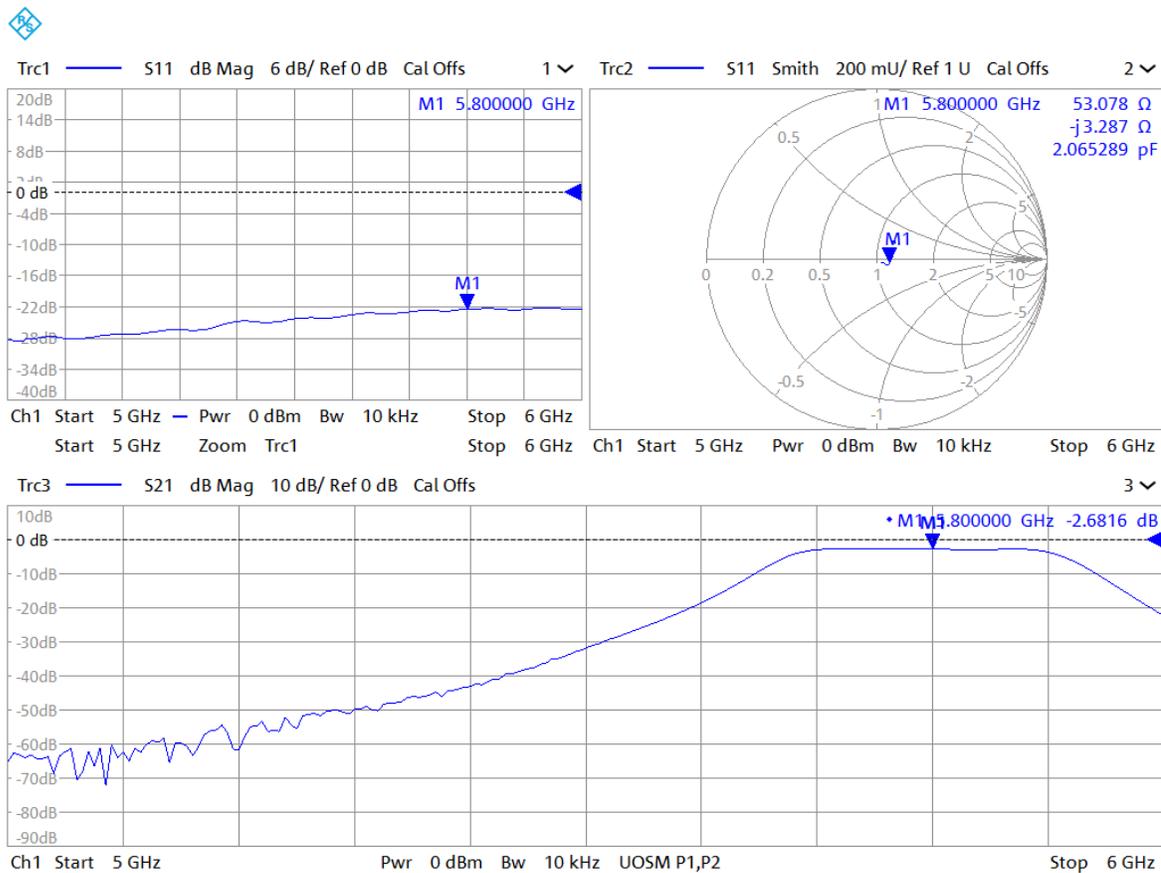


Figura 4-10.: Medidas de parámetros S11 en magnitud y carta de Smith, medida de S21 para el OEO en lazo abierto, con etapa de amplificación.

Para la realización de las pruebas se cierra el lazo y se conecta a la salida del OEO el ESA, de acuerdo con la arquitectura presentada en Figura 4-1, en donde se podrán verificar los modos de oscilación y realizar las medidas del ruido de fase. En la Figura 4-11 se presenta el montaje realizado para el OEO.

En la parte a) de la Figura 4-11, se presenta la etapa óptica, destacando los carretes de FO compuesto por dos bobinas de 500m y 1km, respectivamente. En la parte b), se presenta la etapa de RF, donde los amplificadores son alimentados con 5V.

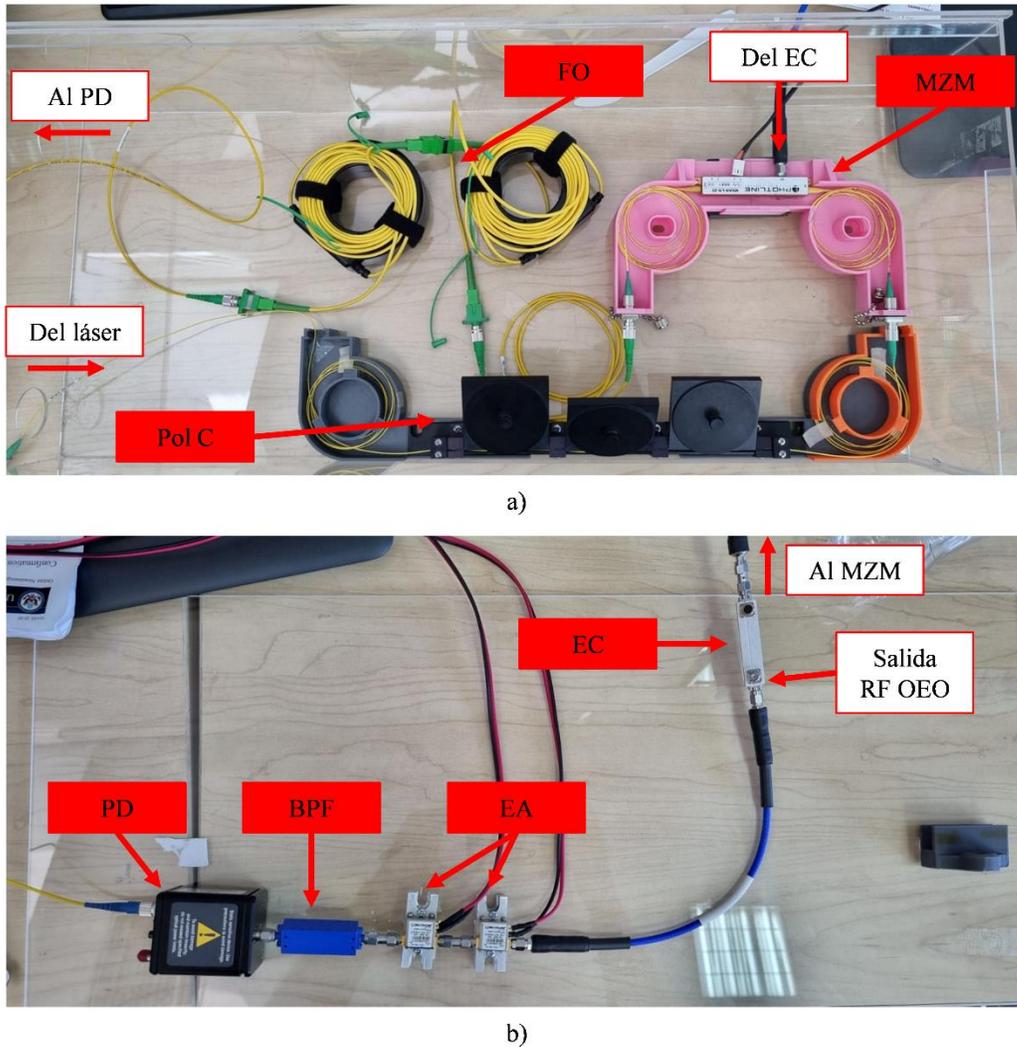


Figura 4-11.: Montaje del OEO.

En la Figura 4-12 se presenta el espectro eléctrico del OEO para diferentes longitudes de FO, donde: a) 500m; b) 1km; c) 1,5km; d) 2km. En estas Figuras, se puede observar el FSR, el cual a medida que aumenta la longitud de la FO reduce el FSR de los modos. Entre los modos, se destaca un modo dominante o modo fundamental, que presenta una mayor amplitud en comparación con los otros modos. Este modo fundamental experimenta inestabilidad y transiciones a otros modos, esto debido a factores como pérdidas no deseadas en el sistema, efectos de dispersión y presencia de interferencias externas. La estabilidad de los modos en estos osciladores es un área de investigación activa y puede depender de la configuración y las condiciones de operación específicas del sistema [78]–[81].

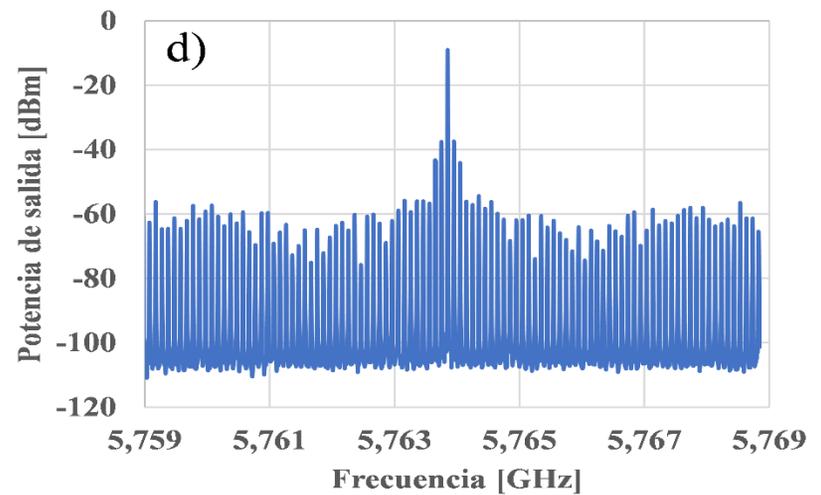
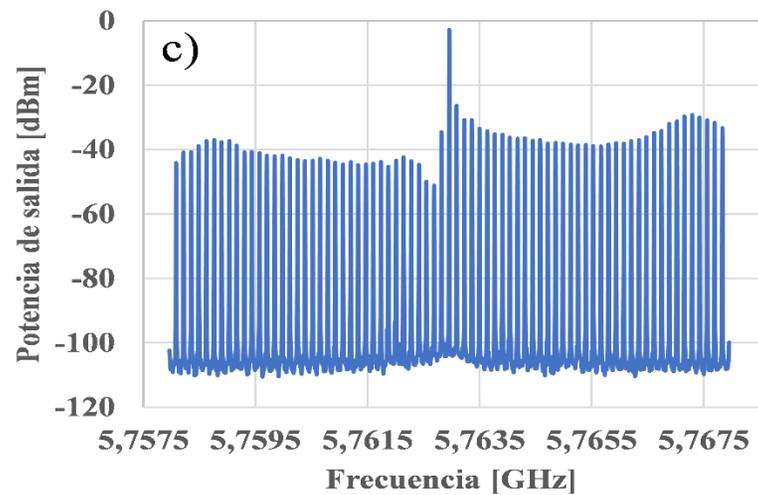
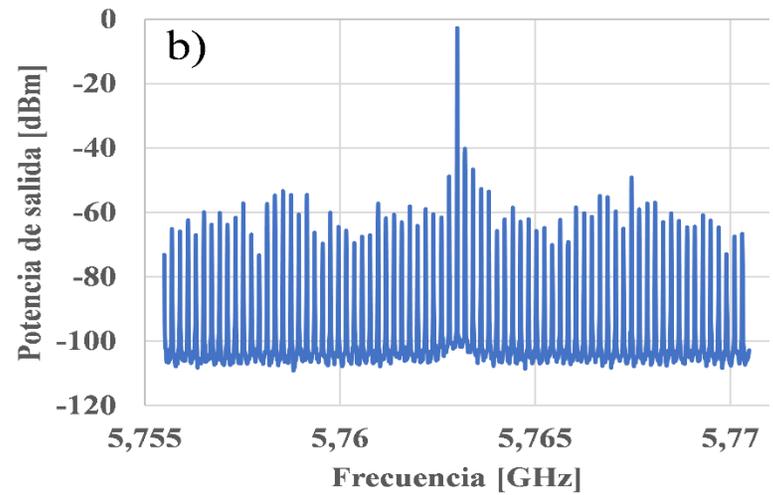
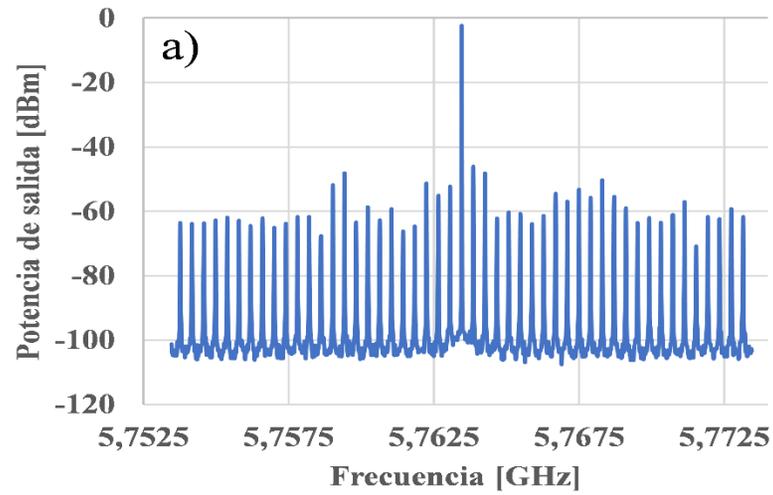


Figura 4-12.: Espectro eléctrico medido del OEO a 5,8GHz con span de 1MHz y RBW de 300Hz.

En la Figura 4-13 se presentan las medidas del ruido de fase del OEO, con diferentes longitudes de la FO. En esta Figura se observa la disminución del ruido de fase debido al aumento de la longitud de la FO (esto aumenta el factor de calidad del elemento resonante [82]). También se observa que los modos laterales se aproximan siguiendo el comportamiento del FSR.

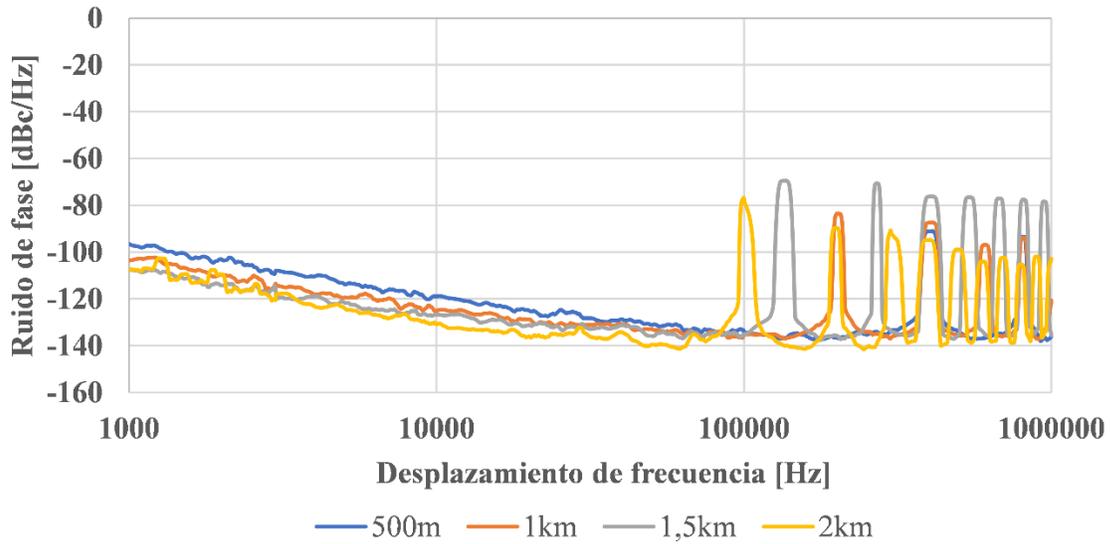


Figura 4-13.: Ruido de fase para el OEO a 5,8GHz con diferentes longitudes en la FO.

Finalmente, en la Tabla 4-2 se presentan los resultados conjuntos de las mediciones realizadas, indicando el modo fundamental de oscilación, el ruido de fase, el rango espectral libre (FSR) y el radio de supresión del modo lateral (SMSR).

Longitud FO	Modo fundamental (GHz)	Ruido de fase (dBc/Hz@10kHz)	FSR (kHz)	SMSR (dB)
500m	5,763460	-118,827	399,6	43,744
1km	5,763006	-125,188	209,789	38,869
1,5km	5,762961	-126,630	129,870	23,606
2km	5,763849	-130,623	99,900	28,014

Tabla 4-2.: Resultados consolidados de las medidas realizadas en el OEO a diferentes FO.

Con el fin de analizar la de la estabilidad del oscilador se realizaron pruebas con el OEO utilizando la FO de 2km, tomando muestras del modo fundamental cada cinco minutos. Sin embargo, se observó que la estabilidad fue de corta duración y a los dos minutos los modos se perdieron requiriendo ajustes manuales en el control de polarización para recuperarlos. Ante esta situación, se decidió realizar la prueba de estabilidad utilizando la FO de 1.5km, la cual presentaba una mayor persistencia durante las pruebas.

En la Figura 4-14 se presentan los modos fundamentales del OEO desarrollado, las medidas se tomaron de 10:30am a 12:30pm. Presentando una máxima variación de 0,4MHz entre los modos fundamentales medidos.

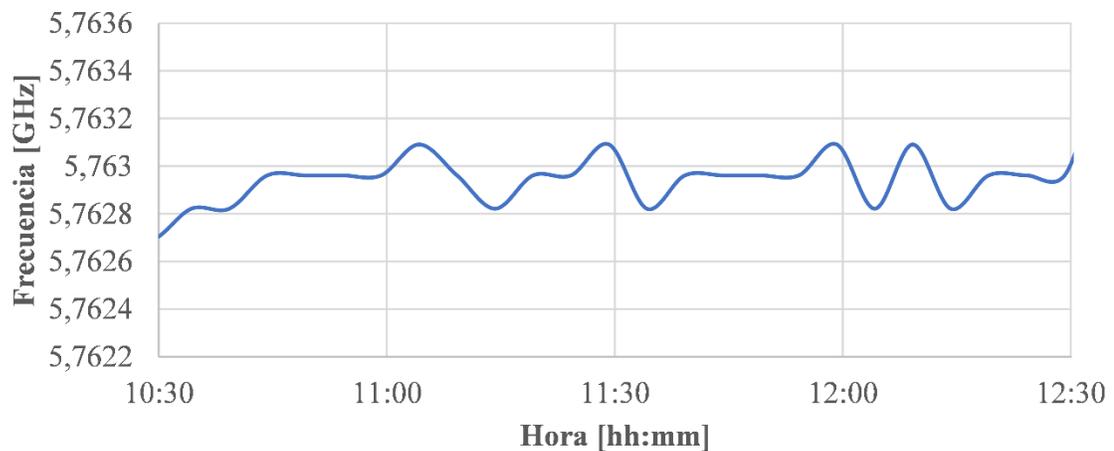


Figura 4-14.: Prueba de estabilidad en el OEO.

5. Sistema ROF integrado con un OEO

Este capítulo está dividido en tres partes, en donde se presenta una descripción del modelo de simulación, la metodología implementada durante la simulación y los resultados obtenidos.

5.1 Arquitectura planteada para integrar un sistema ROF con un OEO

La arquitectura utilizada como base para la integración del sistema ROF con el OEO se presenta en la Figura 5-1. Donde a la salida del fotodetector se realiza la comunicación a través de un canal inalámbrico.

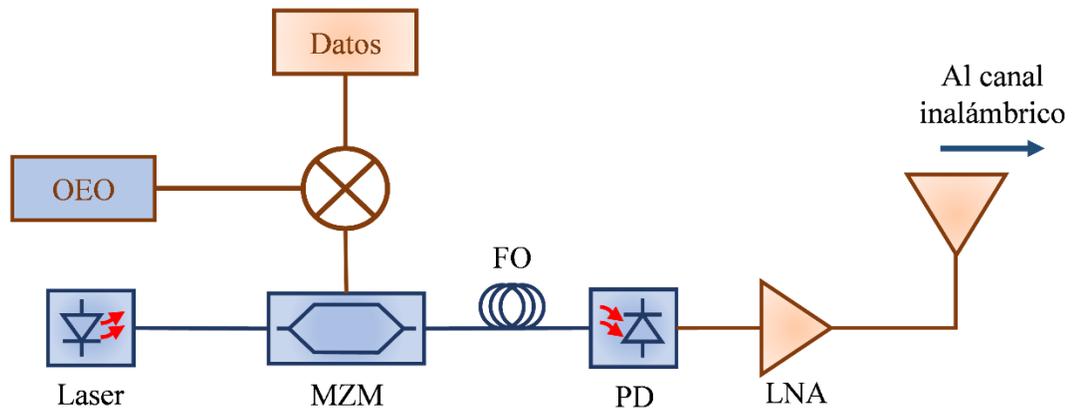


Figura 5-1.: Modelo de integración del sistema ROF y el OEO.

Los datos son generados en una frecuencia inicial de 100MHz, luego son mezclados con la señal del OEO a 5,8GHz mediante el multiplicador, para luego ser transmitidos por el sistema ROF. Se analizan las figuras de mérito (EVM, BER, MER y SNR) en la recepción del canal para los esquemas de modulación (QPSK, 16QAM y 64QAM).

La simulación fue desarrollada en el software Optisystem en conjunto con MATLAB.

5.2 Metodología de simulación para el sistema de ROF con el OEO

De acuerdo con los esquemas trabajados y las características de los componentes utilizados en los capítulos 3 y 4 se realiza el desarrollo del sistema propuesto en la Figura 5-1. Con el fin de evaluar el desempeño del sistema integrado, se realizan los siguientes pasos:

- Se diseña una transmisión sobre un sistema ROF, de acuerdo con los esquemas de modulación planteados. Se plantea un bloque en MATLAB simulando un canal con múltiples caminos y ruido AWGN.
- Se plantea un sistema OEO, con nuevos escenarios y comparándolos con los resultados del capítulo 4.
- Se integran los sistemas propuestos, evaluando su desempeño.

5.3 Desempeño de la integración del OEO y el sistema ROF

De acuerdo con la metodología propuesta, en la Figura 5-2 se presenta el esquema de simulación del sistema ROF planteado. Se ajustaron los parámetros de cada elemento de acuerdo con las caracterizaciones obtenidas en el capítulo 3. Inicialmente se genera una señal QPSK a 100MHz para ser mezclada con una señal de un oscilador local a 5,8GHz y se agrega una etapa de amplificación y filtrado a la salida del mixer, antes de la entrada al MZM. Posteriormente a la salida del fotodetector se amplifica la señal antes de la etapa inalámbrica.

En el bloque de MATLAB se simuló un canal AWGN incorporando un impulso de un filtro digital, que representa una ruta estática de múltiples caminos, luego se recuperó la señal original para posteriormente analizar el EVM y el SNR. Finalmente se procesa la señal con ruido, analizando el BER del sistema. El código del bloque se encuentra en el Anexo B.

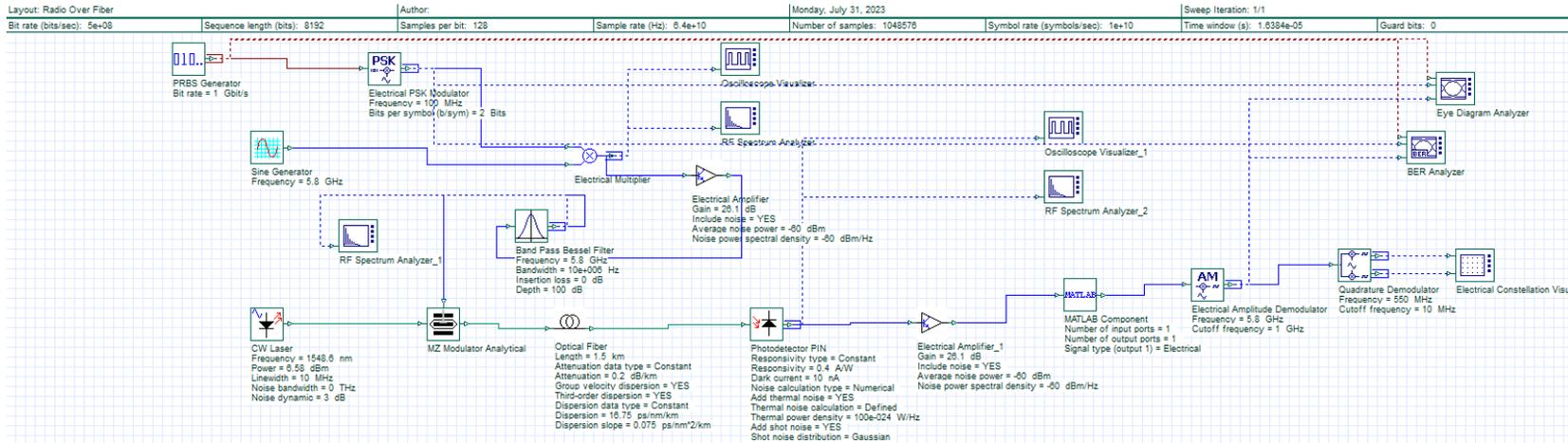


Figura 5-2.: Esquema de simulación para el sistema ROF, en modulación QPSK.

Al final del capítulo 3, se realizó un aumento en la potencia óptica del láser observando una mejora en el rendimiento del sistema. Con el objetivo de profundizar esta relación en la Figura 5-3 se presentan los resultados obtenidos del BER en función de la potencia óptica.

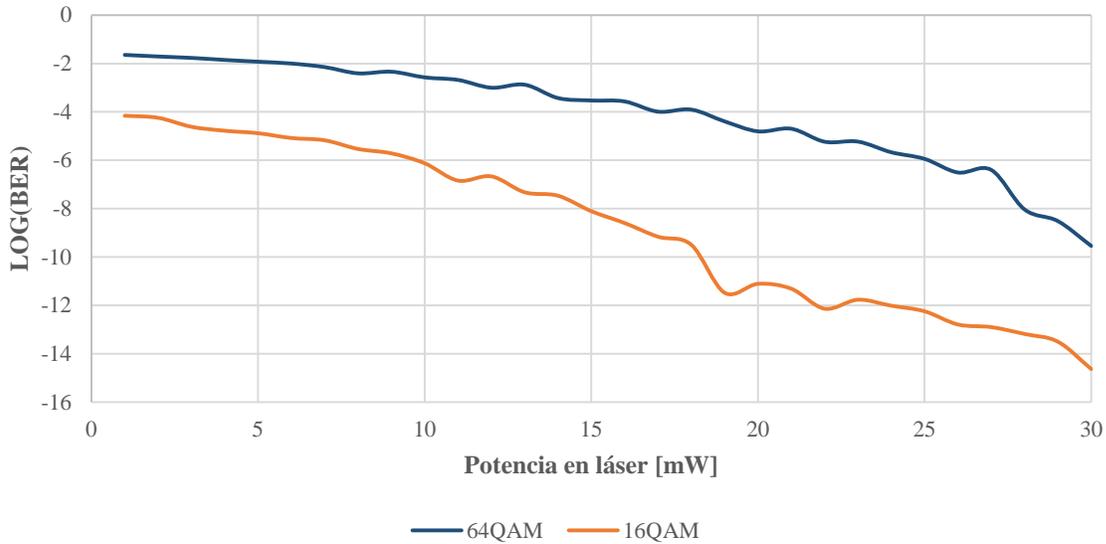


Figura 5-3.: Resultados de la simulación del sistema ROF: Potencia óptica vs BER

Se logra apreciar una mejora en el rendimiento del BER para las modulaiones de 64QAM y 16QAM, a medida que aumenta la potencia en el láser

Para la simulación del OEO, en la Figura 5-4 se presenta el esquema planteado.

La simulación presenta las características de los componentes presentados en el capítulo 4. Sin embargo, al utilizar un filtro con un ancho de banda más estrecho de los 150MHz iniciales, se estableció una mayor selectividad y mejor rechazo al ruido, mejorando las condiciones del OEO. En la Figura 5-5 se presenta el espectro para la simulación con un filtro de 1MHz. El simulador utilizado no es una réplica perfecta de la realidad, sino una representación aproximada del sistema bajo estudio. Aunque se hace todo lo posible para capturar la complejidad y el comportamiento de los componentes y fenómenos ópticos, existen ciertas limitaciones inherentes a la simulación. Estas limitaciones pueden surgir de simplificaciones en los modelos matemáticos, la precisión de los datos de entrada, la consideración de factores externos no tenidos en cuenta, y otros aspectos. Por lo tanto, es importante tener en cuenta que los resultados obtenidos en la simulación pueden proporcionar información valiosa y aproximada sobre el sistema, pero no se deben considerar como un reflejo exacto del comportamiento en la realidad.

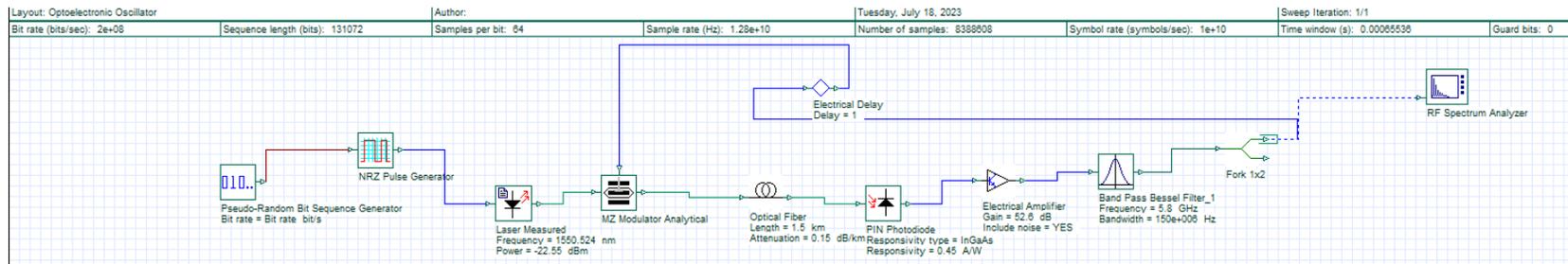


Figura 5-4.: Esquema de simulación para el OEO.

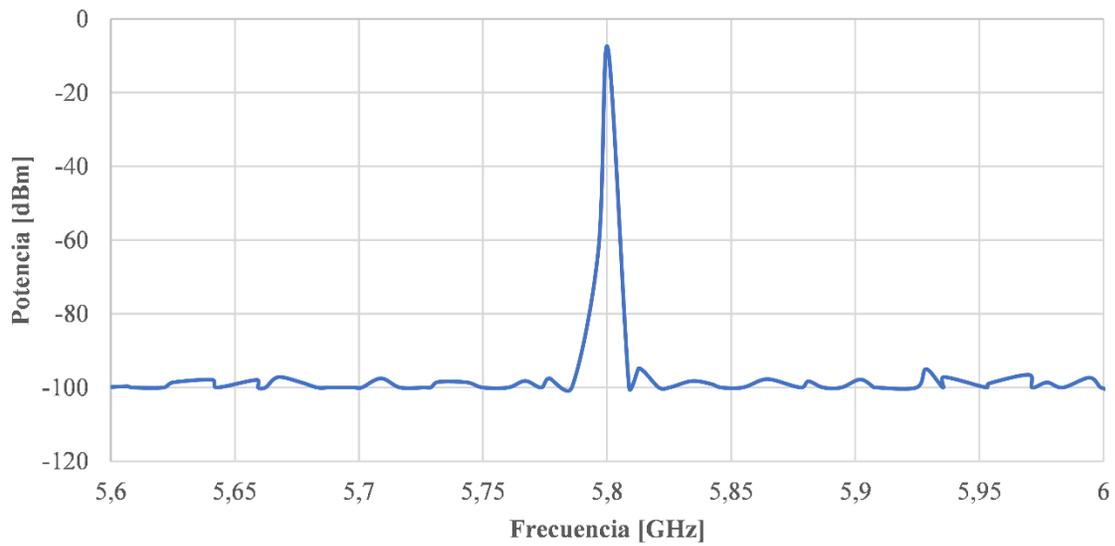


Figura 5-5.: Resultado de la simulación del OEO con filtro de 1MHz.

La integración se presenta realizando el cambio del oscilador local dado en la Figura 5-2 por el OEO diseñado y presentado en la Figura 5-4. En la Figura 5-6 se presenta el esquema de integración del sistema ROF con el OEO.

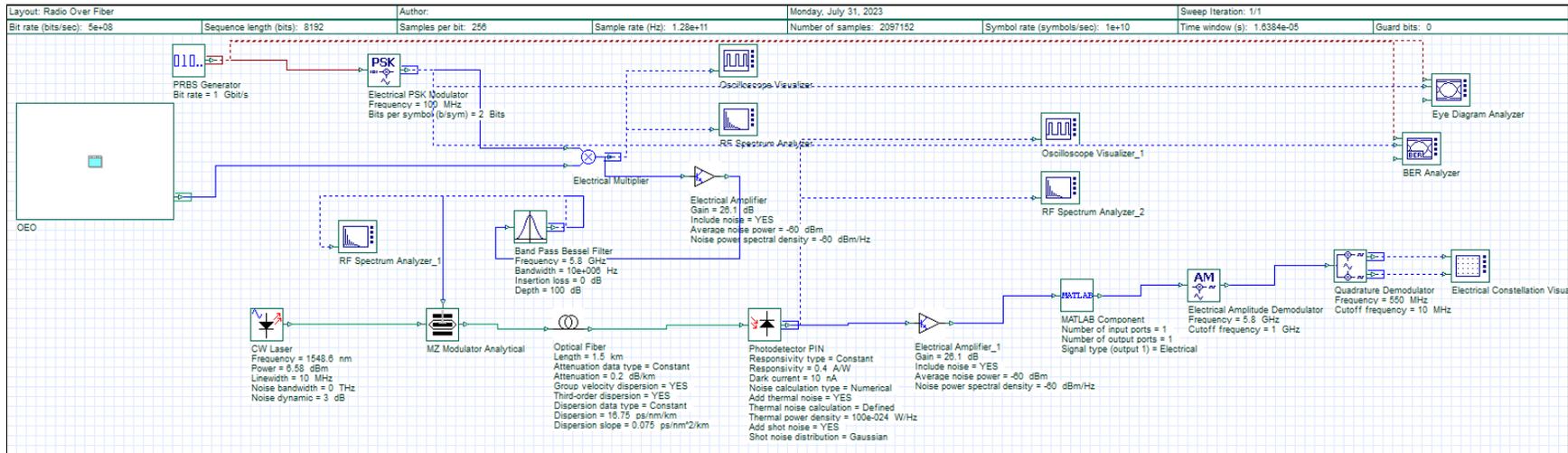


Figura 5-6.: Esquema de simulación para la integración del sistema ROF con el OEO.

Al establecer las pruebas iniciales del sistema se pudo observar un comportamiento adecuado durante la simulación. En la Figura 5-7 se presenta el diagrama de ojo y el BER obtenido para una simulación realizada bajo la modulación QPSK.

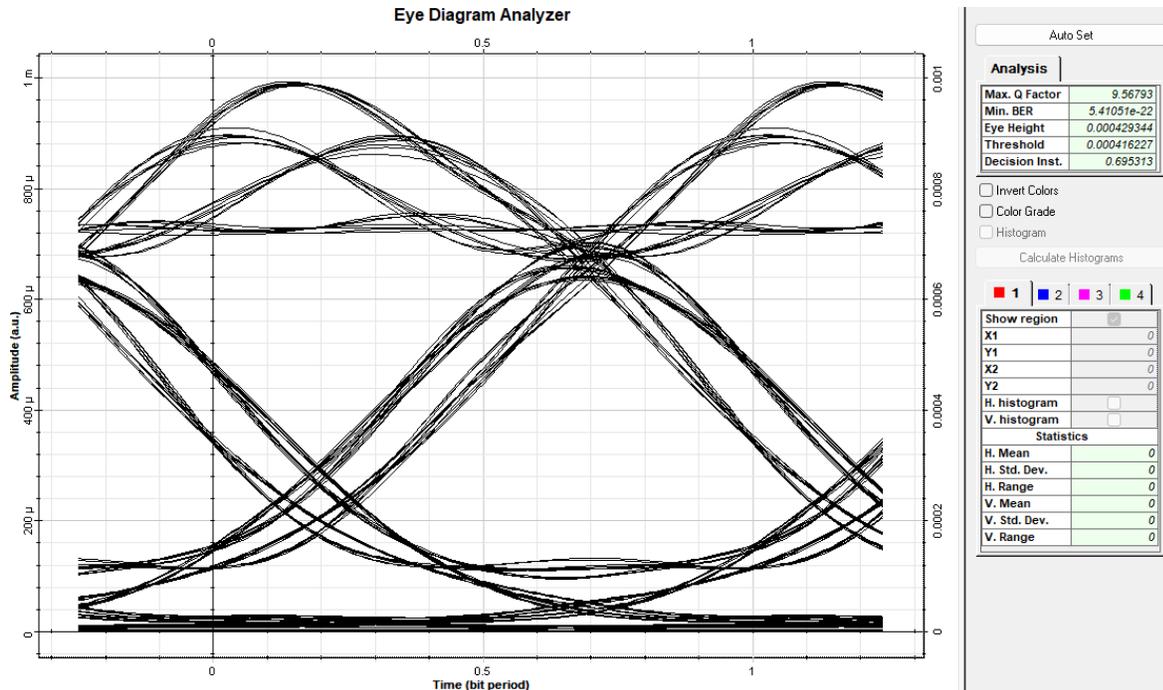


Figura 5-7.: Diagrama de ojo y medidas de BER para simulación en QPSK.

En la Figura 5-8 se presentan los diagramas de constelación del sistema en funcionamiento, presentando medidas de EVM y SNR.

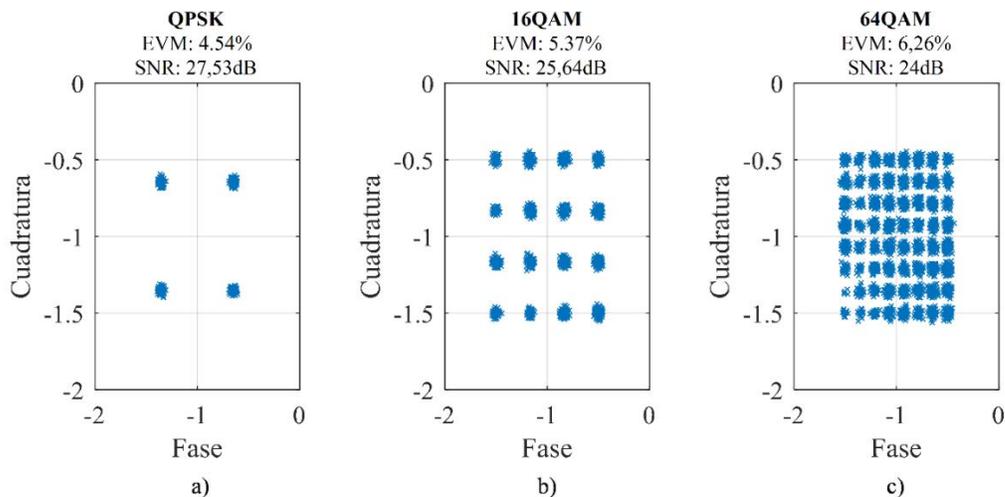


Figura 5-8.: Resultados de la simulación del sistema integrado: diagramas de constelación, EVM y SNR para condiciones iniciales establecidas.

En donde a) es el resultado para QPSK; b) para 16QAM; y c) para 64QAM.

En la Figura 5-9, se presenta el resultado de la simulación del sistema integrado, variando la longitud de la fibra entre 3km y 60km. Verificando los límites FEC establecidos para el sistema propuesto, en QPSK se deja de cumplir a partir de los 46km, en 16QAM después de los 30km y en 64QAM a partir de los 22km.

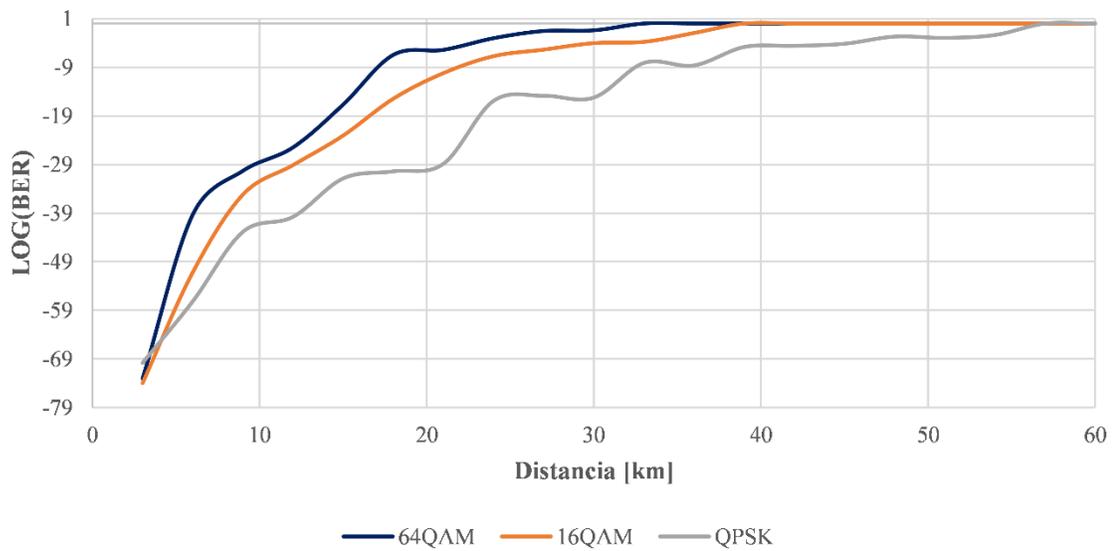


Figura 5-9.: Resultado del sistema integrado: variación en la distancia de transmisión de la fibra vs BER

De igual forma, en la Figura 5-10 se presentan los resultados obtenidos para el EVM en función de diferentes longitudes de fibra en el sistema integrado. En donde se observa, que para la modulación QPSK después de 41km se supera el límite del 17% establecido. Para 16QAM, después de 30km se supera el límite del 12% y para 64QAM, después de 18km se supera el límite del 7%.

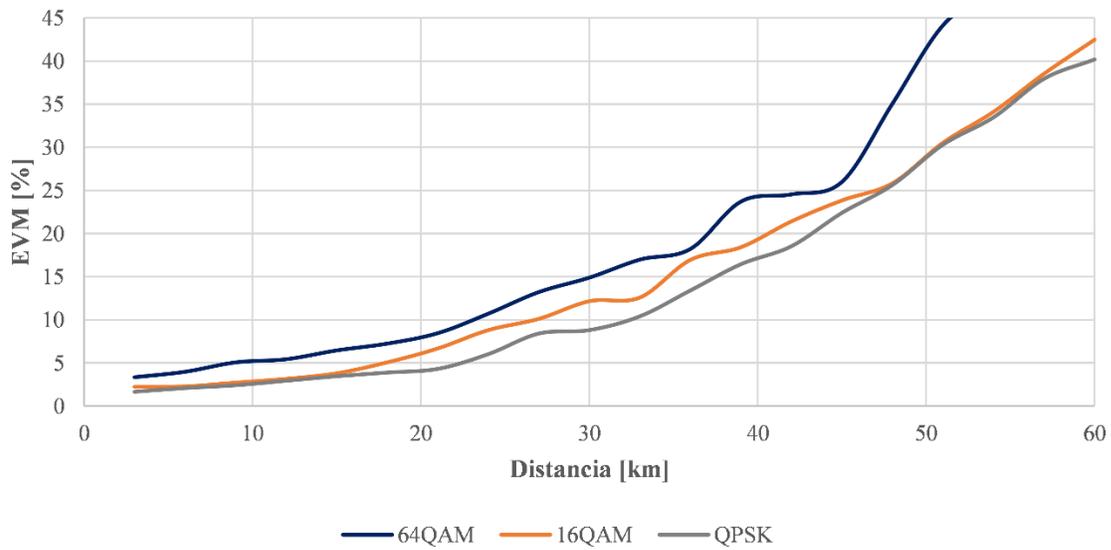


Figura 5-10.: Resultado del sistema integrado: variación en la distancia de transmisión de la fibra vs EVM.

En la Figura 5-11 se presentan los resultados obtenidos para el SNR en función de diferentes longitudes de fibra. Se observa que para QPSK, después de 48km se supera el límite de 9dB establecido. Para 16QAM, después de 42km se supera el límite de 13dB y para 64QAM después de 33km se supera el límite de 16dB.

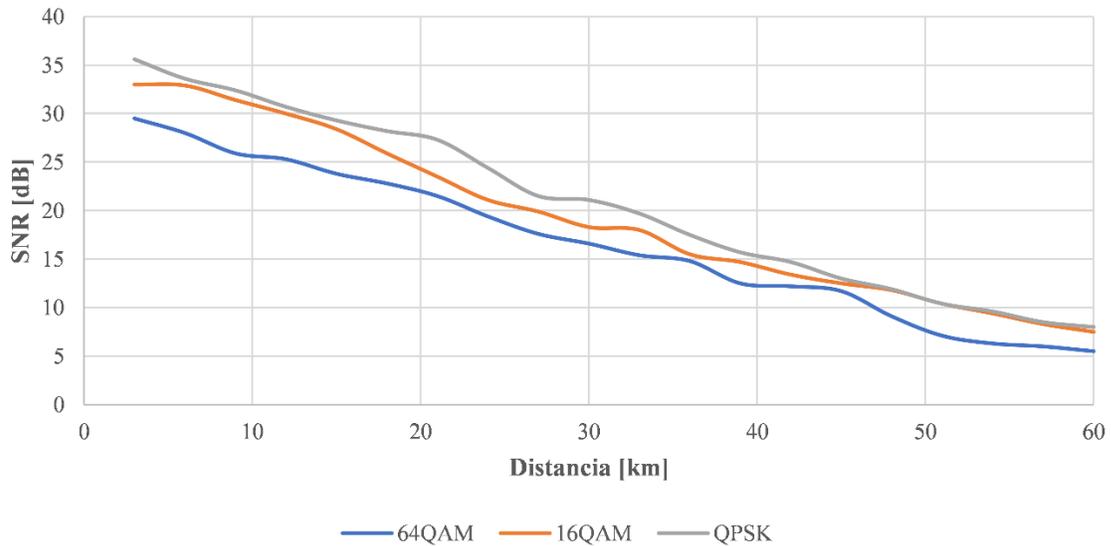


Figura 5-11.: Resultado del sistema integrado: variación en la distancia de transmisión de la fibra vs SNR

6. Conclusiones y recomendaciones

6.1 Conclusiones

Este documento presenta el diseño e implementación de un sistema de radio sobre fibra (ROF) integrando un oscilador optoelectrónico (OEO) mediante una simulación, con éxito. Se recopilieron las principales características para el transporte de señales en los sistemas ROF actuales utilizando la frecuencia de 5,8GHz, validando el EVM, BER, SNR y MER como figuras de mérito para cuantificar su rendimiento en base a límites establecidos por diferentes organismos internacionales de telecomunicaciones.

Se implementó un sistema de ROF para un posible escenario de transporte de imágenes médicas de pacientes que padecen de neumonía, logrando cumplir los límites establecidos para transmisiones con modulación QPSK en las distancias establecidas. Sin embargo, para las modulaciones de 16QAM y 64QAM, se presentaron algunos inconvenientes durante la transmisión, se presentaron algunas soluciones como lo fue ampliar la potencia óptica del láser transmisor. El uso de los USRP permitió hacer la implementación aproximada de un sistema más real.

Se desarrolló un OEO experimental, aplicando distintas líneas de retardo, analizando y corroborando el comportamiento del FSR y el modo fundamental. Los resultados demostraron que a medida que se aumenta la longitud de la línea de retardo, el ruido de fase presenta mejoras, logrando una medida de $-126,630$ [dBc/Hz@10kHz] para una línea de retardo de 1,5 km manteniendo una estabilidad durante dos horas, con variaciones mínimas de no más de 0,4 MHz.

En las pruebas de la integración del sistema ROF con el OEO, en la simulación se adiciona un canal AWGN con múltiples caminos, en donde se evalúa el desempeño para distintas longitudes de fibra óptica, que puede simular distintos escenarios para redes locales o metropolitanas. En estas pruebas se deja en evidencia, que para la modulación QPSK el sistema funciona según los límites establecidos hasta un máximo de 41km, para 16QAM hasta los 30km y 18km para 64QAM.

6.2 Recomendaciones y trabajo futuro

Como primera observación, durante el desarrollo del trabajo no se tomó en cuenta la medida de velocidades de transmisión, debido a las limitaciones de hardware que se presentan en los USRP, ya que no están optimizados para transmisiones de fibra óptica de alta velocidad y podrían no proporcionar el rendimiento necesario para llevar a cabo análisis precisos en este contexto. Se puede plantear un trabajo a futuro evaluando el desempeño en velocidad del sistema, con equipos de radio especializados para estas pruebas.

El uso de técnicas de multiplexación es un escenario de pruebas interesante, como lo puede ser OFDM. En varias investigaciones se presentan los beneficios y como son una solución efectiva para superar las limitaciones y desafíos asociados con la transmisión de señales a través de fibras ópticas en entornos de comunicación inalámbrica de alta velocidad, proporcionando una mayor eficiencia espectral, robustez y flexibilidad en el diseño de estos sistemas.

Sería interesante poder realizar la integración de forma experimental, analizando el comportamiento del modo fundamental y los posibles problemas de sincronización de la transmisión, así como también plantear el uso de un canal bidireccional de subida y bajada, aplicando tecnologías WDM para aplicaciones en LTE o 5G.

Finalmente, valdría la pena evaluar el uso de distintas tecnologías láser, como los VCSEL con modulación directa como un interesante escenario de pruebas, tanto para el sistema ROF como para el OEO.

A. Anexo A: Modulaciones digitales

Los esquemas de modulación presentados en el trabajo: QPSK, 16QAM y 64QAM, ofrecen una amplia eficiencia espectral ya que transmiten múltiples bits por símbolo. En esencia, un símbolo hace referencia a una entidad discreta que lleva una cierta cantidad de información, es decir un conjunto de bits transmitidos. Sin embargo, a medida que aumenta la cantidad de bits transmitidos por símbolo, los esquemas se vuelven más susceptibles al ruido y la interferencia.

Analizar diferentes esquemas de modulación permite identificar las principales fortalezas y debilidades teniendo en cuenta algunas figuras de mérito como lo son el SNR, BER, EVM y MER. A continuación, se presentan algunos detalles de las modulaciones trabajadas.

- Modulación QPSK (*Quadrature Phase Shift Keying*): Es un esquema de modulación digital angular con amplitud constante, similar a la modulación en fase convencional. La constelación de puntos de QPSK consiste en cuatro símbolos equidistantes y cada símbolo representa una combinación única de dos bits. En la Figura A-6-1 se presenta el diagrama de constelación para la modulación QPSK.
- Modulación 16QAM (16 - *Quadrature Amplitude Modulation*): Es un esquema de modulación digital que permite transmitir cuatro bits por símbolo, representados en un diagrama de constelación de dieciséis símbolos. En la Figura A-6-2 se presenta el diagrama de constelación para la modulación 16QAM.
- Modulación 64QAM (64 - *Quadrature Amplitude Modulation*): Es un esquema de modulación digital en el cual su diagrama de constelación se compone de 64 símbolos que permiten transmitir seis bits por símbolo, representando una combinación única. En la Figura A-6-3 se presenta el diagrama de constelación para la modulación 64QAM.

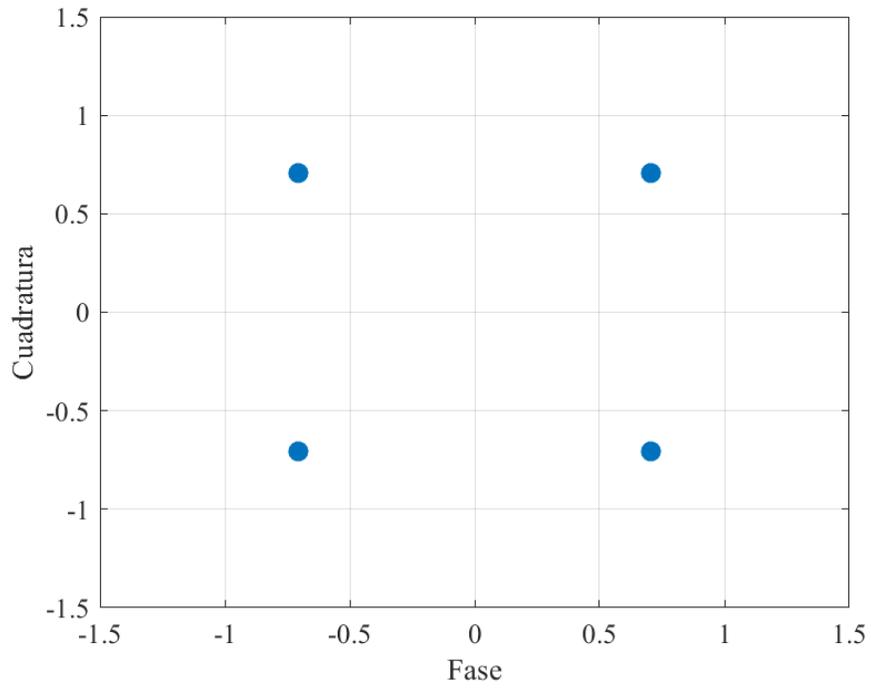


Figura A-6-1.: Diagrama de constelación para la modulación QPSK

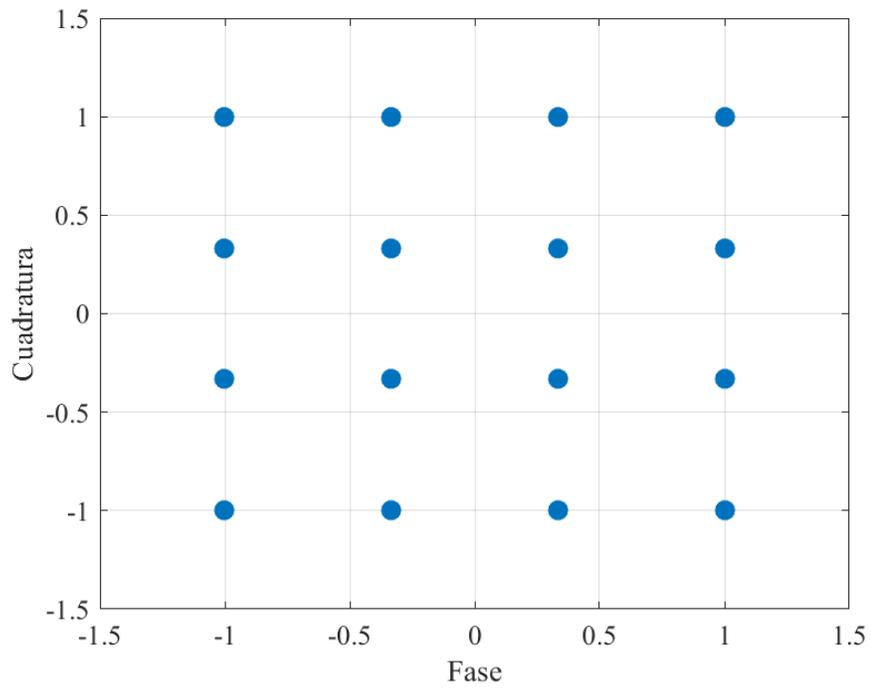


Figura A-6-2.: Diagrama de constelación para la modulación 16QAM

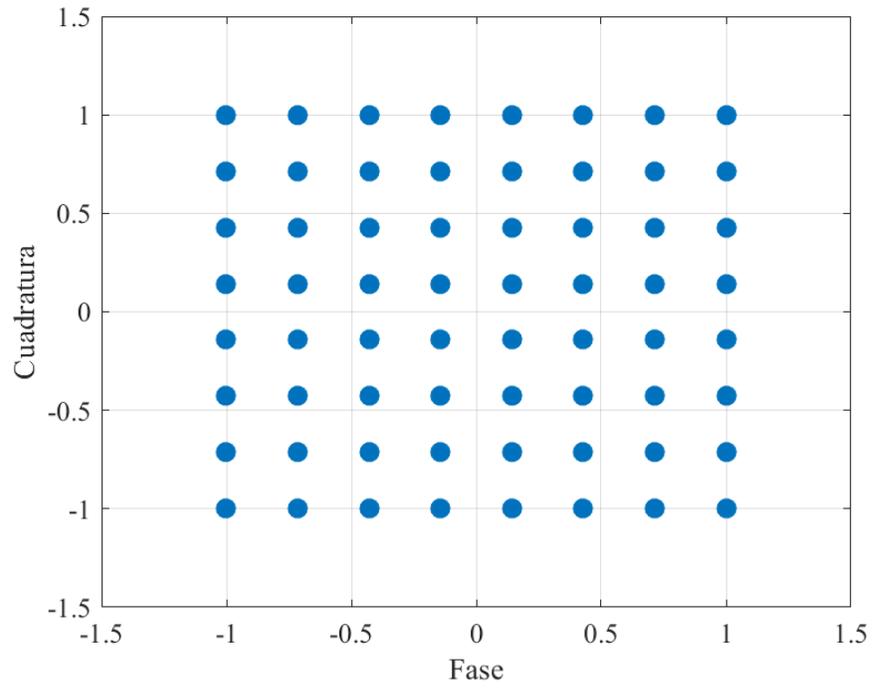


Figura A-6-3.: Diagrama de constelación para la modulación 64QAM

B. Anexo B: Esquemas de Software

Dado que se utilizaron los softwares MATLAB y GNURadio, se presentan los códigos utilizados en MATLAB para función de transmisión y recepción y los esquemáticos de bloques en GNURadio para transmisión y recepción.

Código TX Matlab:

```
% Parámetros de la transmisión
fs = 1.25e6; % Frecuencia de muestreo
fc = 5.8e9; % Frecuencia central
fc_offset = 0; % Desplazamiento de frecuencia
ampl = 1; % Amplitud de la señal
imagen_file = 'pneu2.bmp'; % Imagen

% Metodo: QPSK, 16QAM, 64QAM
mod_method = "64QAM";
mod_methods = {'QPSK', '16QAM', '64QAM'};
mod_order = find (ismember(mod_methods,mod_method) ) ;

% Lectura de la imagen
im = imread('pneu2.bmp');
im_bin = dec2bin(im(:))';
im_bin = im_bin(:);

%% Flujo binario a símbolos
% Analizar flujo binario en símbolos de bit mod_order
% Pads señal de entrada a la longitud adecuada

sym_rem = mod(mod_order-mod(length(im_bin), mod_order),mod_order) ;
padding = repmat('0',sym_rem,1);
im_bin_padded = [im_bin;padding];
cons_data = reshape(im_bin_padded,mod_order, length(im_bin_padded)/mod_order)';
cons_sym_id = bin2dec(cons_data) ;

%% Modulación de símbolos
% QPSK
if mod_order == 1
    mod_ind = 2^(mod_order-1);
    n = 0:pi/mod_ind:2*pi-pi/mod_ind;
    in_phase = cos(n+pi/4);
    quadrature = sin(n+pi/4);
```

```

    symbol_book = (in_phase + quadrature*1i)';
end

% 16QAM, 64QAM
if mod_order == 2 || mod_order == 3
    mod_ind = sqrt(2^mod_order) ;
    in_phase = repmat (linspace (-1,1,mod_ind),mod_ind, 1);
    quadrature = repmat (linspace (-1,1,mod_ind)',1,mod_ind);
    symbol_book = in_phase(:) + quadrature(:) *1i;
end
% Modular datos de acuerdo con symbol_book
X = symbol_book(cons_sym_id+1);

% Creación del objeto USRP
tx = comm.SDRuTransmitter('Platform', 'B200', 'SerialNum', '30EA06C');
tx.CenterFrequency = fc;
tx.MasterClockRate = fs;
tx.InterpolationFactor = 100;
tx.Gain = 20;

% Transmitir la señal
tx(X. '); % Transmitir la señal QPSK

% Liberar el objeto USRP
release(tx);

```

Codigo RX Matlab:

```

% Parámetros de la recepción
fs = 1.25e6; % Frecuencia de muestreo
fc = 5.8e9; % Frecuencia central
fc_offset = 0; % Desplazamiento de frecuencia
rx_buffer_size = 5e6; % Tamaño del búfer de recepción

% Creación del objeto USRP
rx = comm.SDRuReceiver('Platform', 'B200', 'SerialNum', '31A454E');
rx.CenterFrequency = fc;
rx.MasterClockRate = fs;
rx.DecimationFactor = 100;
rx.Gain = 70;
rx.OutputDataType = 'double';
rx.SamplesPerFrame = rx_buffer_size;

% Metodo: QPSK, 16QAM, 64QAM
mod_method = "64QAM";
mod_methods = {'QPSK', '16QAM', '64QAM'};
mod_order = find (ismember(mod_methods,mod_method) ) ;

% Recepción de la señal

```

```
X = rx();

% Demodulación de la señal
rec_syms = knnsearch([real(symbol_book) imag(symbol_book)], [real(X) imag(X)] - 1);

% Analizar el flujo binario y eliminar el relleno de símbolos
rec_syms_cons = dec2bin(rec_syms);
rec_im_bin = reshape(rec_syms_cons', numel(rec_syms_cons), 1);
rec_im_bin = rec_im_bin(1:end-sym_rem);

ber = sum(abs(rec_im_bin - im_bin))/length(im_bin);

% Conversión de la secuencia de bits a imagen
bits_received_reshaped = reshape(bits_received, 8, []).';
imagen_gray_received = bin2dec(char(bits_received_reshaped + '0')); %
Conversión de binario a decimal
imagen_received = reshape(imagen_gray_received, size(imagen_gray)); %
Reconstrucción de la imagen

% Cálculo de EVM
evm = comm.EVM('ReferenceSignalSource', rec_syms_cons, 'MeasuredSignal', X);
evm_percent = evm();

% Cálculo de SNR
snr_db = 10 * log10(var(rec_syms_cons) / var(X - rec_syms_cons));

% Cálculo de MER
mer_db = 10 * log10(max(abs(rec_syms_cons)).^2 / mean(abs(X -
rec_syms_cons)).^2);

% Cálculo de BER
ber = biterr(bits, bits_received) / length(bits);

% Valores
fprintf('EVM: %.2f%%\n', evm_percent);
fprintf('SNR: %.2f dB\n', snr_db);
fprintf('MER: %.2f dB\n', mer_db);
fprintf('BER: %.2e\n', ber);

% Mostrar la imagen recibida
plot (qamdemod(1:500:end), 'x', 'markersize', 3);
xlim([-2 2]);
ylim([-2 2]);
xlabel('Fase', 'FontName', 'Times New Roman', 'FontSize', 12)
ylabel ('Cuadratura', 'FontName', 'Times New Roman', 'FontSize', 12);

title (sprintf ('\bfQPSK\n\rmDistancia de transmisión: 1m\n\rmBER:
%2.g\n\rmEVM: %2.g%\n\rmSNR: %2.gdB\n\rmMER:
%2.gdB', ber, evm_percent, snr_db, mer_db), 'FontName', 'Times New Roman',
'FontSize', 12);
grid on;

% Liberar el objeto USRP
```

release(rx);

Códigos de bloques en GNURadio para transmisión:

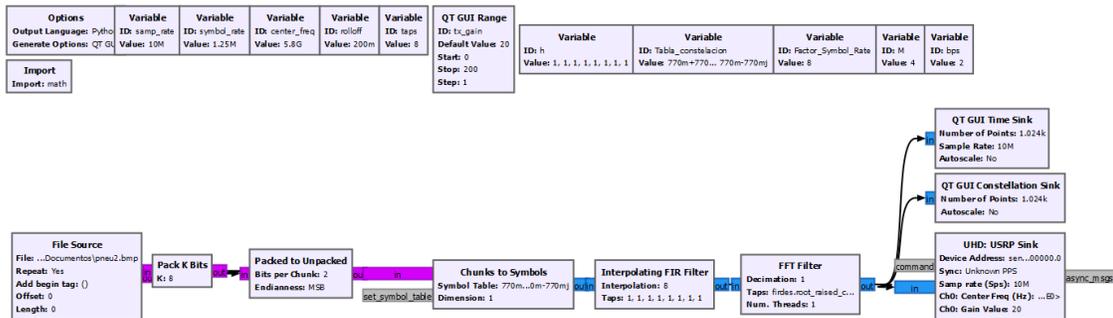


Figura A-6-4.: Bloques de transmisión en GNURadio.

Códigos de bloques en GNURadio para recepción:

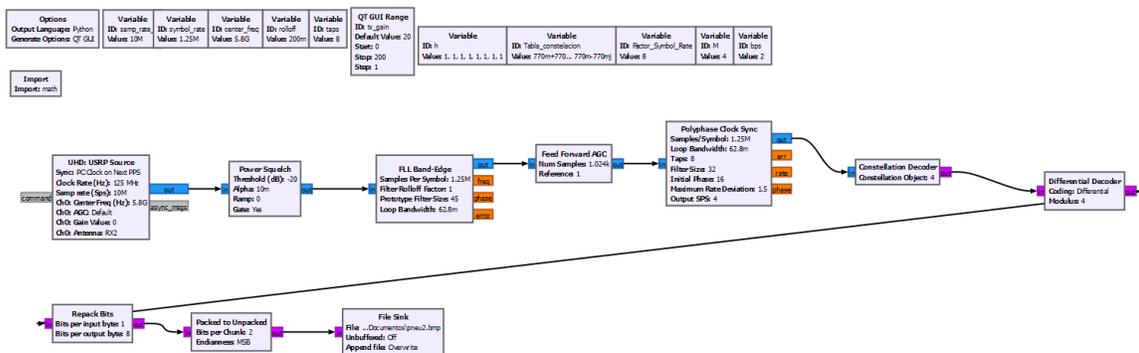


Figura A-6-5.: Bloques de recepción en GNURadio.

Código de bloque ROF en Optisystem:

%Relacionar la entrada a una nueva variable
X = InputPort1;

%Filtro multipath
txfilt = comm.RaisedCosineTransmitFilter;
sign = txfilt(X);

```
spacing = zeros(5,1);
mpCH = [0.2; spacing; -0.2; spacing; 0.12];
mpChout = filter(mpCH,1,sign);

%Inclusion del canal AWGN
SNR = 15; % dB
chmpawgn = awgn(mpChout,SNR);

%Recuperación de la señal
fc = 5.8e9;
Fs = 100e6;
decimation_factor = round(fc / Fs);
decimated_signal = downsample(mpChout, decimation_factor);
envelope = abs(hilbert(decimated_signal));
fc_demod = 5.8e9;
t_demod = 0:1/Fs:(length(envelope)-1)/Fs;
carrier = cos(2*pi*fc_demod*t_demod);
demodulated_signal = envelope .* carrier;
qpsk_demodulated = pskdemod(demodulated_signal, 4);

%Calculos
error_signal = decimated_signal - qpsk_demodulated;
rms_error = rms(error_signal);
rms_original = rms(original_signal);
evm = (rms_error / rms_original) * 100;
noise_signal = decimated_signal - qpsk_demodulated;
snr = 10 * log10(var(qpsk_demodulated) / var(noise_signal));

%Establecer señal con ruido como salida
OutputPort1 = chmpawgn;
```

Código para calcular el ruido de fase:

```
close all
clc
format long

ES = csvread('oeo1.csv',0,0);
figure

plot(ES(:,1)*1e-9,ES(:,2))
grid on
grid minor
xlabel('Frequency(GHz)')
ylabel('dBm')
title('Electrical Spectrum')

%Phase Noise
RBW = 300;
maximo = max(ES(:,2))
i = find(ES(:,2)==maximo)
Lf = zeros(i-length(ES(:,1)));
```

```
Lf1 = zeros(i-length(ES(:,1)));
salto = ES(2,1)-ES(1,1)
k = 1;
for j=i:length(ES(:,1))
    Lf(k) = ES(j,2)-ES(i,2);
    Lf1(k) = ES(j,2)-ES(i,2)-10*log10(RBW);
    %- ,
    j = j + 1;
    k = k + 1;
end

figure
semilogx((0:length(Lf)-1)*salto,Lf)
hold on
semilogx((0:length(Lf)-1)*salto,Lf1,'r')
xlabel('Frecuencia [Hz]')
ylabel('Ruido de fase [dBc/Hz]')
title(['Ruido de fase: f_c=' num2str(ES(i,1))*1e-9 ' GHz, RBW=' num2str(RBW) ' Hz'])

grid on
grid minor
```

C. Anexo C: Manejo de instrumentos y esquemas de medición

Se utilizó para el ESA R&S FSW43 en conjunto con la licencia FSW-K70, con la cual se pudieron obtener las figuras de mérito mencionadas. Se deben detallar datos de symbol_rate, tipo de modulación, frecuencia central, frecuencia de muestreo, entre otros valores. Para el caso de medición de BER, se deben generar los paquetes a transmitir, y realizar la carga en la transmisión del USRP con la herramienta de secuencias, presentada en la Figura A-6-6.

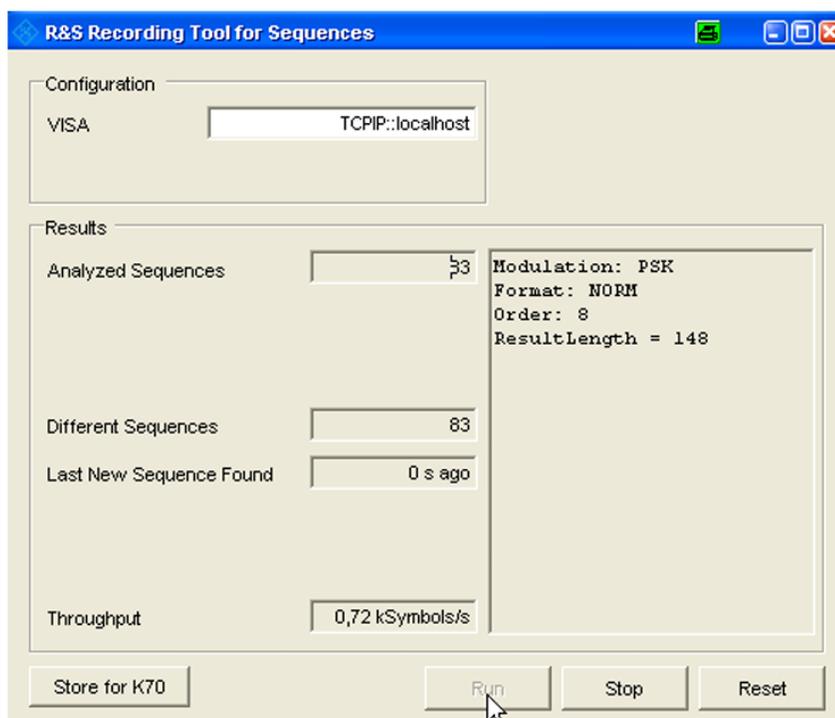


Figura A-6-6.: Herramienta para generar secuencias de transmisión.

En la Figura A-6-7 se presenta la visualización de resultados para una transmisión de QPSK a 6m.

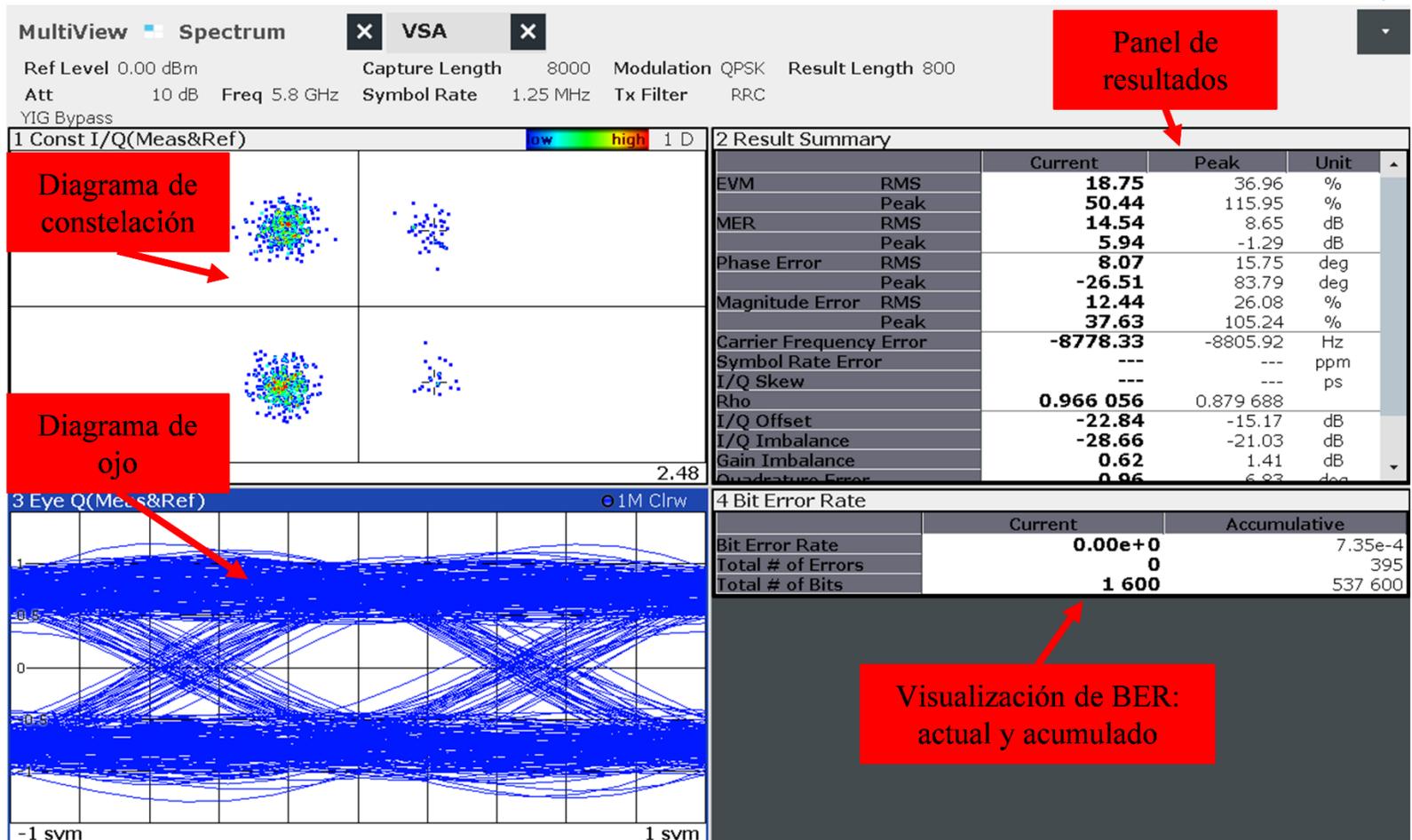


Figura A-6-7.: Esquema de visualización de datos en ESA.

D. Anexo D: Resultados de pruebas en Radio sobre Fibra

1 metro	QPSK				16QAM				64QAM			
Prueba	LOG (BER)	MER (dB)	SNR (dB)	EVM (%)	LOG (BER)	MER (dB)	SNR (dB)	EVM (%)	LOG (BER)	MER (dB)	SNR (dB)	EVM (%)
1	Nan	24,52	25,72	5,16	-5,37	19,35	19,26	10,59	-1,40	17,47	17,52	13,50
2	Nan	23,24	24,22	6,24	-5,66	19,86	20,43	9,81	-1,30	17,63	17,72	12,52
3	Nan	23,86	24,84	5,74	-5,22	19,26	19,55	10,48	-1,53	17,35	17,45	13,40
4	Nan	22,59	23,23	6,90	-5,10	19,37	19,74	9,40	-1,65	17,71	17,84	12,84
5	Nan	24,57	25,86	5,11	-4,98	19,28	19,17	10,65	-1,87	17,55	17,65	13,18

Tabla A-6-1.: Resultados de pruebas ROF a 1 metro de distancia, recepción en USRP.

3 metros	QPSK				16QAM				64QAM			
Prueba	LOG (BER)	MER (dB)	SNR (dB)	EVM (%)	LOG (BER)	MER (dB)	SNR (dB)	EVM (%)	LOG (BER)	MER (dB)	SNR (dB)	EVM (%)
1	NaN	18,49	18,75	11,73	-3,24	17,47	17,51	13,20	-1,15	15,16	15,23	17,46
2	NaN	18,57	18,86	11,51	-2,94	16,61	16,66	14,54	-1,29	15,61	15,77	16,42
3	NaN	19,54	19,88	10,26	-3,46	17,36	17,43	13,40	-1,34	15,53	15,64	16,74
4	NaN	19,12	19,43	10,72	-3,48	17,02	17,11	13,91	-1,12	15,34	15,42	17,09
5	NaN	18,59	18,89	11,55	-3,16	16,77	16,81	14,27	-1,37	15,44	15,53	16,37

Tabla A-6-2.: Resultados de pruebas ROF a 3 metros de distancia, recepción en USRP.

6 metros	QPSK				16QAM				64QAM			
Prueba	LOG (BER)	MER (dB)	SNR (dB)	EVM (%)	LOG (BER)	MER (dB)	SNR (dB)	EVM (%)	LOG (BER)	MER (dB)	SNR (dB)	EVM (%)
1	-8,88	15,83	15,96	16,16	-2,25	14,43	14,25	19,03	-1,01	13,46	13,75	21,28
2	NaN	16,10	16,21	15,59	-1,89	14,24	14,01	19,32	-1,22	13,56	13,82	21,03
3	-9,00	16,00	16,15	15,74	-2,13	14,53	14,38	18,70	-1,17	13,08	13,31	22,38
4	-8,76	15,92	16,82	16,86	-2,44	14,83	14,60	18,06	-1,11	13,46	13,74	21,15
5	-8,42	15,68	15,72	16,52	-2,06	14,63	14,47	18,51	-1,15	13,27	13,54	21,71

Tabla A-6-3.: Resultados de pruebas ROF a 6 metros de distancia, recepción en USRP.

Imetro	QPSK				16QAM				64QAM			
	BER	MER (dB)	SNR (dB)	EVM (%)	BER	MER (dB)	SNR (dB)	EVM (%)	BER	MER (dB)	SNR (dB)	EVM (%)
1	NaN	23,71	24,30	6,09	-5,56	19,45	19,56	10,52	-3,95	17,36	17,57	13,23
2	NaN	24,49	24,54	5,93	-5,63	18,06	19,00	11,23	-2,71	16,96	17,10	13,96
3	NaN	23,79	24,63	5,87	-5,00	19,72	20,38	9,57	-2,26	16,36	17,12	13,93
4	NaN	22,70	23,43	6,74	-5,29	19,75	20,70	9,22	-3,10	17,52	17,94	12,68
5	NaN	24,66	25,24	5,47	-4,51	20,26	20,32	9,64	-2,80	15,86	16,68	14,66
6	NaN	21,51	21,95	7,98	-4,46	19,44	19,56	10,52	-3,18	17,73	18,22	12,27
7	NaN	21,70	22,38	7,61	-4,33	19,74	20,45	9,49	-3,77	15,71	16,60	14,79
8	NaN	21,57	22,03	7,91	-4,67	19,32	19,58	10,50	-2,16	17,75	18,07	12,48
9	NaN	25,04	25,55	5,28	-4,97	20,00	20,60	9,33	-3,26	15,86	16,54	14,89
10	NaN	23,37	24,04	6,28	-4,93	17,94	18,42	12,00	-3,41	16,16	16,84	14,39
11	NaN	25,42	25,61	5,24	-5,32	18,19	19,06	11,15	-2,44	17,20	17,67	13,07
12	NaN	22,21	22,35	7,63	-4,46	19,61	20,05	9,94	-2,13	16,22	16,67	14,68
13	NaN	25,28	25,34	5,41	-5,26	19,00	19,08	11,12	-2,30	18,12	18,17	12,35
14	NaN	24,14	24,62	5,88	-4,72	19,26	19,53	10,56	-2,72	17,45	18,02	12,56
15	NaN	21,84	22,43	7,56	-4,41	18,26	18,96	11,27	-2,20	15,84	16,73	14,56
16	NaN	25,00	25,09	5,57	-4,87	20,03	20,16	9,81	-2,26	17,01	17,05	14,05
17	NaN	24,66	24,95	5,66	-4,16	20,41	20,46	9,49	-2,13	17,55	17,64	13,13
18	NaN	25,02	25,54	5,28	-4,29	19,25	19,31	10,83	-2,60	16,67	17,19	13,82
19	NaN	25,45	25,55	5,28	-4,38	18,84	19,23	10,93	-2,05	16,23	17,05	14,04
20	NaN	24,16	24,70	5,82	-4,31	17,82	18,57	11,79	-3,20	17,97	18,03	12,54
21	NaN	22,42	22,67	7,35	-4,88	19,48	19,98	10,02	-3,68	17,40	18,33	12,11
22	NaN	21,60	22,18	7,78	-5,59	20,00	20,48	9,46	-3,46	16,40	16,82	14,42
23	NaN	22,83	23,25	6,88	-4,58	18,50	19,00	11,21	-2,53	15,99	16,49	14,97
24	NaN	21,80	22,41	7,58	-5,13	20,13	20,18	9,79	-2,99	17,14	17,89	12,76
25	NaN	24,72	24,80	5,76	-5,85	20,12	20,91	9,01	-2,19	17,69	18,01	12,58

26	NaN	24,22	24,68	5,84	-4,33	17,62	18,56	11,81	-3,64	16,09	16,93	14,24
27	NaN	24,54	24,57	5,91	-4,52	20,27	20,75	9,17	-2,56	16,70	17,26	13,70
28	NaN	21,82	22,68	7,34	-4,03	19,61	19,69	10,37	-2,20	17,56	17,99	12,61
29	NaN	24,40	25,05	5,59	-5,10	20,11	20,28	9,69	-2,58	17,29	18,17	12,34
30	NaN	23,92	24,76	5,78	-4,13	18,97	19,92	10,09	-2,73	16,79	17,09	13,98
31	NaN	21,68	22,43	7,56	-4,24	19,73	20,18	9,79	-3,24	17,09	17,25	13,72
32	NaN	22,93	23,27	6,86	-4,99	19,12	19,25	10,90	-3,08	17,64	17,85	12,81
33	NaN	22,12	22,77	7,27	-5,12	20,43	20,86	9,06	-3,33	15,72	16,54	14,89
34	NaN	23,79	24,35	6,06	-4,66	19,64	19,76	10,28	-3,87	16,39	16,97	14,17
35	NaN	22,19	23,07	7,02	-5,77	18,94	19,76	10,28	-3,73	16,87	17,53	13,28
36	NaN	24,33	24,50	5,96	-4,99	18,00	18,77	11,52	-3,91	17,72	18,37	12,06
37	NaN	24,51	24,61	5,88	-5,75	18,21	19,19	10,98	-3,51	16,54	17,21	13,79
38	NaN	21,69	22,07	7,88	-5,21	18,08	19,07	11,13	-3,30	16,42	16,70	14,62
39	NaN	23,20	23,92	6,37	-4,60	20,39	20,89	9,02	-3,75	15,92	16,82	14,43
40	NaN	25,00	25,36	5,39	-4,38	19,40	19,54	10,55	-3,21	17,33	17,88	12,77
41	NaN	24,45	25,35	5,40	-5,09	20,01	20,38	9,58	-3,01	16,43	17,40	13,49
42	NaN	23,00	23,47	6,71	-4,43	18,88	19,24	10,91	-2,30	16,83	16,93	14,24
43	NaN	24,56	24,59	5,89	-4,42	20,42	20,88	9,04	-3,41	17,97	18,33	12,13
44	NaN	23,60	23,64	6,58	-5,90	19,95	20,41	9,54	-3,14	15,98	16,87	14,34
45	NaN	24,10	24,67	5,84	-5,25	17,69	18,65	11,68	-2,41	15,80	16,71	14,61
46	NaN	22,97	23,34	6,81	-5,37	19,16	19,26	10,89	-3,67	17,44	18,15	12,37
47	NaN	22,24	22,93	7,13	-4,93	19,68	20,67	9,25	-3,64	16,49	17,48	13,37
48	NaN	24,16	24,78	5,77	-4,18	18,34	18,86	11,40	-3,10	17,67	17,71	13,01
49	NaN	25,36	25,82	5,12	-4,85	19,74	20,69	9,23	-2,05	16,41	16,78	14,49
50	NaN	22,13	22,32	7,66	-5,47	18,57	18,70	11,61	-3,10	16,83	16,92	14,26

Tabla A-6-4.: Resultados de pruebas ROF a 1 metro de distancia, recepción en ESA.

3metros	QPSK				16QAM				64QAM			
	BER	MER (dB)	SNR (dB)	EVM (%)	BER	MER (dB)	SNR (dB)	EVM (%)	BER	MER (dB)	SNR (dB)	EVM (%)
1	NaN	18,46	18,80	11,48	-3,75	15,22	15,93	15,98	-1,16	14,87	14,88	18,02
2	NaN	20,77	21,30	8,60	-4,79	17,00	17,64	13,12	-1,11	14,52	15,50	16,79
3	NaN	18,40	18,75	11,55	-3,36	17,10	17,11	13,94	-1,12	14,21	14,35	19,17
4	NaN	20,70	21,18	8,73	-4,55	17,00	17,64	13,13	-1,41	14,59	14,97	17,85
5	NaN	18,24	19,00	11,22	-4,51	17,22	17,71	13,02	-1,58	14,16	14,49	18,86
6	NaN	19,13	19,71	10,34	-3,18	16,26	16,70	14,62	-1,34	14,73	15,64	16,52
7	NaN	19,29	19,80	10,23	-4,87	15,62	15,98	15,89	-1,67	14,97	15,24	17,29
8	NaN	20,13	20,18	9,79	-4,34	15,27	16,17	15,54	-1,55	13,46	14,32	19,24
9	NaN	21,06	21,39	8,52	-4,26	16,31	17,27	13,69	-1,38	14,44	14,87	18,04
10	NaN	18,42	19,20	10,97	-2,07	15,05	16,03	15,79	-1,86	14,73	15,54	16,71
11	NaN	19,24	19,79	10,25	-3,04	16,09	16,50	14,97	-1,57	14,78	15,27	17,24
12	NaN	18,60	19,03	11,18	-2,11	16,86	17,01	14,10	-1,88	15,36	15,40	16,98
13	NaN	19,99	20,69	9,24	-4,14	16,64	17,47	13,39	-1,60	14,30	15,00	17,78
14	NaN	18,15	19,00	11,22	-4,63	15,68	16,60	14,80	-1,87	14,15	15,10	17,57
15	NaN	18,70	19,34	10,79	-3,69	16,17	16,96	14,18	-1,19	14,13	14,95	17,89
16	NaN	21,22	21,91	8,03	-3,28	16,24	16,63	14,74	-1,98	14,08	15,00	17,79
17	NaN	21,58	21,61	8,31	-3,34	15,77	16,04	15,78	-1,24	15,14	15,52	16,74
18	NaN	18,06	18,58	11,77	-4,55	15,59	16,55	14,88	-1,44	14,47	15,24	17,30
19	NaN	19,36	19,57	10,51	-4,45	15,44	16,33	15,26	-1,10	14,85	15,65	16,51
20	NaN	18,43	18,43	11,98	-3,49	16,64	17,44	13,43	-1,21	15,25	15,41	16,96
21	NaN	17,98	18,73	11,57	-2,19	15,74	16,39	15,16	-1,19	14,24	14,89	18,00
22	NaN	18,32	19,01	11,21	-3,79	15,93	16,88	14,32	-1,25	14,37	14,62	18,59
23	NaN	17,52	18,47	11,92	-2,78	16,05	16,24	15,41	-1,68	14,83	15,26	17,27
24	NaN	19,08	20,05	9,95	-2,10	16,49	16,99	14,14	-1,17	14,18	14,97	17,85

25	NaN	19,02	19,16	11,02	-3,84	16,58	16,68	14,65	-1,10	14,30	14,44	18,97
26	NaN	18,89	19,27	10,87	-3,33	16,04	16,89	14,31	-1,80	14,39	14,72	18,36
27	NaN	19,26	20,25	9,72	-2,84	16,80	17,03	14,07	-1,66	14,11	14,64	18,55
28	NaN	19,40	19,83	10,20	-2,43	15,91	16,31	15,29	-1,50	13,74	14,30	19,26
29	NaN	21,30	21,31	8,60	-3,29	15,94	16,37	15,20	-1,57	14,35	14,64	18,54
30	NaN	19,21	19,92	10,09	-2,44	16,46	17,01	14,11	-1,82	13,58	14,30	19,28
31	NaN	19,30	20,12	9,86	-2,47	17,03	17,07	14,01	-1,66	14,85	15,85	16,12
32	NaN	19,78	20,18	9,80	-3,76	16,92	17,24	13,74	-1,76	13,51	14,21	19,48
33	NaN	21,31	21,33	8,58	-4,63	16,01	16,60	14,79	-1,47	14,50	15,18	17,43
34	NaN	18,12	19,11	11,08	-2,17	16,42	16,49	14,97	-1,64	14,33	14,45	18,95
35	NaN	19,70	20,48	9,46	-3,80	16,42	16,84	14,39	-1,46	14,26	14,51	18,81
36	NaN	18,45	19,19	10,98	-3,61	16,14	16,39	15,16	-1,69	14,64	14,97	17,84
37	NaN	19,68	20,30	9,66	-3,86	15,50	16,44	15,07	-1,05	14,87	15,25	17,28
38	NaN	21,75	21,81	8,12	-2,15	16,82	17,46	13,40	-1,75	15,12	15,72	16,38
39	NaN	19,45	20,39	9,57	-3,99	17,41	17,51	13,33	-1,24	13,80	14,40	19,05
40	NaN	18,08	18,76	11,54	-2,79	16,19	16,53	14,91	-1,68	14,37	14,72	18,37
41	NaN	20,30	21,01	8,90	-4,83	15,98	16,68	14,65	-1,87	15,09	15,75	16,30
42	NaN	19,78	20,07	9,92	-4,55	15,73	15,99	15,86	-1,08	14,87	15,61	16,58
43	NaN	19,73	20,53	9,41	-4,11	17,35	17,40	13,49	-1,94	13,92	14,07	19,80
44	NaN	17,78	18,50	11,89	-3,61	16,71	16,82	14,42	-1,57	13,72	14,55	18,73
45	NaN	19,12	19,53	10,55	-2,82	17,32	17,56	13,25	-1,64	13,89	14,53	18,78
46	NaN	17,89	18,83	11,44	-4,36	15,97	16,45	15,06	-1,16	14,33	14,40	19,05
47	NaN	20,28	21,18	8,73	-2,27	15,74	16,42	15,09	-1,50	13,90	14,07	19,80
48	NaN	20,84	21,57	8,35	-4,13	17,11	17,14	13,90	-1,60	13,21	14,21	19,49
49	NaN	18,86	19,70	10,36	-3,23	15,43	16,05	15,75	-1,00	15,07	15,41	16,97
50	NaN	19,20	19,21	10,95	-2,65	16,76	17,52	13,30	-1,88	14,49	14,66	18,50

Tabla A-6-5.: Resultados de pruebas ROF a 3 metros de distancia, recepción en ESA.

6metros	QPSK				16QAM				64QAM			
	BER	MER (dB)	SNR (dB)	EVM (%)	BER	MER (dB)	SNR (dB)	EVM (%)	BER	MER (dB)	SNR (dB)	EVM (%)
1	-9,00	16,29	16,89	14,31	-1,43	13,54	14,12	19,68	-0,71	13,23	13,39	21,42
2	-9,00	16,64	17,05	14,04	-2,45	13,51	14,06	19,81	-0,81	12,50	13,39	21,39
3	-8,13	15,63	15,74	16,34	-1,62	13,88	14,59	18,64	-0,87	11,79	12,45	23,85
4	NaN	14,67	15,44	16,91	-2,67	14,14	14,79	18,21	-1,38	13,14	13,15	22,01
5	-9,00	15,57	16,32	15,28	-2,63	14,49	14,71	18,39	-0,57	12,50	13,09	22,15
6	-8,21	14,33	15,09	17,60	-1,57	13,87	14,68	18,45	-1,23	13,30	13,54	21,04
7	-8,96	15,03	15,68	16,45	-1,18	14,19	14,46	18,92	-1,59	11,94	12,64	23,35
8	-8,36	16,48	16,85	14,36	-1,35	12,82	13,60	20,89	-0,59	12,37	13,32	21,59
9	-8,84	17,01	17,02	14,09	-2,92	14,39	14,44	18,96	-1,55	12,47	12,84	22,80
10	NaN	14,57	14,94	17,90	-1,72	12,99	13,88	20,24	-0,55	12,77	13,50	21,14
11	-8,49	15,94	16,87	14,35	-2,92	13,11	13,62	20,85	-0,57	12,39	12,90	22,64
12	-8,58	14,35	15,34	17,10	-1,62	13,40	13,91	20,15	-1,75	12,10	12,24	24,44
13	-8,06	15,57	16,01	15,84	-2,46	14,00	14,67	18,46	-1,33	11,53	12,44	23,87
14	-8,89	15,61	15,65	16,50	-2,82	13,56	13,66	20,74	-1,13	12,09	12,74	23,08
15	-8,31	16,27	16,88	14,33	-1,24	13,57	14,19	19,52	-0,81	12,34	13,32	21,57
16	-8,36	16,11	16,59	14,81	-1,20	13,45	13,90	20,18	-0,57	12,58	13,26	21,73
17	-8,26	14,95	15,04	17,70	-1,35	13,07	14,00	19,95	-1,32	13,25	13,46	21,22
18	-8,20	15,44	16,03	15,80	-1,39	14,21	14,48	18,87	-1,05	12,91	13,24	21,77
19	-8,46	15,09	15,89	16,04	-2,83	13,91	13,99	19,97	-1,95	11,81	12,54	23,60
20	-8,07	15,39	15,78	16,26	-1,37	13,42	13,61	20,86	-1,80	12,37	12,53	23,64
21	-8,65	15,32	15,90	16,03	-1,68	12,82	13,78	20,46	-1,35	11,43	12,12	24,79
22	-9,00	16,58	16,87	14,34	-1,05	13,21	13,98	19,99	-1,73	12,19	13,00	22,38
23	-9,00	15,36	16,13	15,62	-1,89	12,87	13,73	20,58	-1,81	11,34	12,30	24,26

24	-8,61	15,97	16,95	14,21	-1,37	13,09	13,64	20,79	-0,58	11,83	12,34	24,17
25	-8,39	15,13	15,45	16,89	-2,05	13,96	14,07	19,80	-1,87	12,13	12,55	23,58
26	-8,71	15,30	15,70	16,40	-1,39	14,65	14,84	18,11	-0,60	12,55	13,44	21,29
27	-8,47	15,59	16,15	15,57	-1,73	13,84	14,13	19,67	-1,60	11,91	12,86	22,75
28	-8,66	15,20	16,13	15,61	-2,61	13,60	13,61	20,87	-1,03	12,72	12,90	22,66
29	NaN	16,47	16,61	14,78	-2,26	13,24	14,00	19,95	-0,70	12,95	13,10	22,13
30	-9,00	15,25	16,04	15,78	-1,43	13,78	14,04	19,85	-1,17	12,67	13,36	21,48
31	-8,10	15,12	16,02	15,82	-1,40	13,92	13,99	19,98	-0,55	11,23	12,20	24,56
32	-8,66	16,03	16,59	14,81	-2,31	13,45	13,85	20,30	-1,52	12,46	12,52	23,65
33	-8,01	14,56	15,23	17,32	-1,17	13,82	14,29	19,29	-0,67	12,12	12,30	24,26
34	-8,73	16,63	17,04	14,06	-2,71	13,27	13,60	20,89	-1,28	13,24	13,39	21,41
35	-9,00	14,36	15,28	17,22	-2,71	13,70	13,75	20,53	-0,72	12,46	12,70	23,17
36	-8,77	16,07	16,23	15,43	-2,25	14,51	14,74	18,33	-0,86	11,63	12,30	24,26
37	-8,19	16,47	16,94	14,23	-1,35	14,22	14,63	18,56	-1,25	12,60	13,09	22,15
38	NaN	14,83	14,97	17,85	-1,86	13,78	14,15	19,61	-1,40	13,34	13,38	21,42
39	NaN	15,44	16,22	15,45	-1,80	13,00	13,74	20,56	-1,46	12,51	12,99	22,40
40	-8,44	16,06	16,82	14,43	-1,01	13,08	13,97	20,01	-1,62	12,82	13,43	21,30
41	-8,38	14,92	15,82	16,19	-2,97	13,45	14,32	19,23	-0,47	13,34	13,49	21,16
42	-8,57	14,45	15,23	17,31	-2,92	14,07	14,35	19,16	-0,34	12,27	12,98	22,45
43	-9,00	15,52	15,92	16,00	-2,45	13,95	13,99	19,98	-0,63	11,93	12,32	24,22
44	-8,74	16,06	16,74	14,55	-2,38	14,08	14,83	18,14	-0,56	12,26	13,00	22,40
45	-9,00	16,72	16,76	14,53	-1,35	13,90	14,49	18,86	-1,39	11,97	12,96	22,50
46	-8,12	15,96	16,32	15,28	-1,84	13,28	13,57	20,95	-0,58	12,40	12,49	23,74
47	-9,00	16,38	16,45	15,05	-1,43	13,85	14,54	18,75	-0,56	12,40	13,39	21,40
48	-8,75	14,89	15,36	17,06	-2,00	13,66	14,61	18,60	-0,56	11,75	12,38	24,04
49	-8,39	15,82	16,02	15,81	-2,92	13,48	14,20	19,51	-1,73	12,82	13,27	21,70
50	-8,61	14,51	15,22	17,34	-2,50	13,70	13,97	20,03	-1,26	11,46	12,38	24,04

Tabla A-6-6.: Resultados de pruebas ROF a 6 metros de distancia, recepción en ESA.

Bibliografía

- [1] “THE GLOBAL STATE OF DIGITAL IN OCTOBER 2022 - We Are Social USA.” <https://wearesocial.com/us/blog/2022/10/the-global-state-of-digital-in-october-2022/> (accessed Dec. 07, 2022).
- [2] J. J. G. Torres, “Monitoreo del efecto de la dispersión cromática en un sistema de radio sobre fibra basado en técnicas de procesamiento digital de señales,” Universidad Nacional de Colombia, 2012.
- [3] R. Avó, P. Laurêncio, and M. C. R. Medeiros, “Simulation of mm-wave over fiber employing optical single sideband modulation combined with subcarrier multiplexing,” *ICTON-MW 2008 - International Conference on Transparent Optical Networks “Mediterranean Winter” 2008 - Conference Proceedings*, pp. 2–6, 2008, doi: 10.1109/ICTONMW.2008.4773081.
- [4] N. Gomes, P. Monteiro, and A. Gameiro, *Next Generation Wireless Communications Using Radio Over Fiber*. John Wiley & Sons, 2012.
- [5] X. N. Fernando, *Radio Over Fiber For Wireless Communications*, 1st Editio. Ryerson University, Canada: Wiley, 2014.
- [6] A. Bortsov, Y. Il’in, and S. Smolskiy, *Laser Optoelectronic Oscillators*, vol. 232. Springer, 2020.
- [7] F. Zou *et al.*, “Optoelectronic oscillator for 5G wireless networks and beyond,” *J Phys D Appl Phys*, vol. 54, no. 42, 2021, doi: 10.1088/1361-6463/ac13f2.
- [8] Z. Tang and S. Pan, “Transmission of 3-Gb/s uncompressed HD video in a optoelectronic- oscillator-based radio over fiber link,” *BioWireleSS 2013 - Proceedings: 2013 IEEE Topical Conference on Biomedical Wireless Technologies, Networks, and Sensing Systems - 2013 IEEE Radio and Wireless Week, RWW 2013*, pp. 142–144, 2013, doi: 10.1109/BioWireleSS.2013.6613702.

- [9] M. A. Ilgaz and B. Batagelj, "Proposal for distribution of a low-phase-noise oscillator signal in forthcoming fifth-generation mobile network by radio-over-fibre technology," *Proceedings Elmar - International Symposium Electronics in Marine*, vol. 2016-Novem, no. September, pp. 13–16, 2016, doi: 10.1109/ELMAR.2016.7731744.
- [10] M. Shin and P. Kumar, "1.25 Gbps optical data channel up-conversion in 20 GHz-band via a frequency-doubling optoelectronic oscillator for radio-over-fiber systems," in *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, IEEE, 2007, pp. 63–66. doi: 10.1109/MWSYM.2007.380219.
- [11] A. Dixit, "Architectures and algorithms for radio-over-fiber networks," *Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 10, no. 5, pp. 535–544, 2018, doi: 10.1364/JOCN.10.000535.
- [12] D. Wake, A. Nkansah, and N. J. Gomes, "Radio over fiber link design for next generation wireless systems," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 28, no. 16, pp. 2456–2464, 2010, doi: 10.1109/JLT.2010.2045103.
- [13] J. Bohata, M. Komanec, J. Spacil, R. Slavik, and S. Zvanovec, "Transmitters for Combined Radio over a Fiber and Outdoor Millimeter-Wave System at 25 GHz," *IEEE Photonics J*, vol. 12, no. 3, 2020, doi: 10.1109/JPHOT.2020.2997976.
- [14] N. Gomes, P. Monteiro, and A. Gameiro, *Next Generation Wireless Communications Using Radio Over Fiber*. John Wiley & Sons, 2012.
- [15] N. Ghazisaidi, M. Maier, and C. M. Assi, "Fiber-wireless (FiWi) access networks: A survey," *IEEE Communications Magazine*, vol. 47, no. 2, pp. 160–167, 2009, doi: 10.1109/MCOM.2009.4785396.
- [16] N. Kamiya, M. Oishi, A. Bekkali, K. Nishimura, and K. Tanaka, "Study on signal modulation schemes for millimeter-wave band RoF transmission systems with optical signal re-modulation," *2014 International Topical Meeting on Microwave Photonics / the 9th Asia-Pacific Microwave Photonics Conference, MWP/APMP 2014 - Proceedings*, pp. 9–12, 2014, doi: 10.1109/MWP.2014.6994476.
- [17] M. Andrea and R. Martínez, "Hybrid Optical Fiber-Wireless Communication to Support Tactile Internet," p. 136, 2019.
- [18] E. Avendaño Fernandez, J. J. Granada Torres, A. M. Cardenas Soto, and N. Guerrero Gonzalez, "Análisis del Impacto de la Conversión Analógica a Digital en el

- Desempeño de Sistemas RoF Digitalizado,” *Inge Cuc*, vol. 15, no. 1, pp. 77–88, 2019, doi: 10.17981/ingecuc.15.1.2019.07.
- [19] A. Bortsov, Y. Il’in, and S. Smolskiy, *Laser Optoelectronic Oscillators*, vol. 232. Springer, 2020. [Online]. Available: <http://www.springer.com/series/624>
- [20] J. F. Coronel Rico, “Injection Locked VCSEL Based Oscillator – ILVBO Juan Fernando Coronel Rico Universidad Nacional de Colombia Facultad de Ingeniería , Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica 2016 INJECTION LOCKED VCSEL BASED OSCILLATOR – ILVBO By Juan Fernando C,” 2016.
- [21] R. Hui and M. O’Sullivan, “Basic Instrumentation for Optical Measurement,” *Fiber Optic Measurement Techniques*, pp. 129–258, Jan. 2009, doi: 10.1016/B978-0-12-373865-3.00002-1.
- [22] T. Hao *et al.*, “Optoelectronic parametric oscillator,” *Light Sci Appl*, vol. 9, no. 1, 2020, doi: 10.1038/s41377-020-0337-5.
- [23] J. Zhang, Y. Wang, X. Li, Z. Liu, and J. Wo, “Tunable multi-frequency optoelectronic oscillator based on a microwave photonic filter and an electrical filter,” *Opt Quantum Electron*, vol. 53, no. 7, pp. 1–10, 2021, doi: 10.1007/s11082-021-03061-0.
- [24] L. A. D. de Britto, J. Panasiewicz, G. M. Pacheco, and A. Banerjee, “Optoelectronic oscillator with dual-loop in the RF domain,” *Opt Quantum Electron*, vol. 53, no. 9, pp. 1–18, 2021, doi: 10.1007/s11082-021-03128-y.
- [25] N. Da Dalt and A. Sheikholeslami, *Understanding Jitter and Phase Noise*. 2018. doi: 10.1017/9781316981238.
- [26] M. E. Belkin and L. Belkin, “Microwave opto-electronic oscillator research,” *Proceedings - 2010 IEEE Region 8 International Conference on Computational Technologies in Electrical and Electronics Engineering, SIBIRCON-2010*, pp. 589–593, 2010, doi: 10.1109/SIBIRCON.2010.5555138.
- [27] S. V. Shinde, “Review of oscillator phase noise models,” *Lecture Notes in Engineering and Computer Science*, vol. 2210, no. January, 2014.
- [28] D. B. Leeson, “A Simple Model of Feedback Oscillator Noise Spectrum,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 54, no. 2, pp. 329–330, 1966, doi: 10.1109/PROC.1966.4682.
- [29] B. Saleh and M. Teich, *Fundamentals of photonics*, vol. 5, no. March. 2019.

- [30] M. Z. Chowdhury, M. T. Hossan, A. Islam, and Y. M. Jang, "A Comparative Survey of Optical Wireless Technologies: Architectures and Applications," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 9819–9840, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2792419.
- [31] "ITU Radiocommunication Sector." <https://www.itu.int/en/ITU-R/Pages/default.aspx> (accessed Jan. 16, 2023).
- [32] "IEEE SA - The IEEE Standards Association - Home." <https://standards.ieee.org/> (accessed Jan. 16, 2023).
- [33] "ETSI - Welcome to the World of Standards!" <https://www.etsi.org/> (accessed Mar. 21, 2023).
- [34] J. Capmany, J. Fraile, and J. Marti, *Fundamentos de Comunicaciones ópticas*. Editorial Sintesis, 1998.
- [35] ANE, "Cuadro nacional de atribución de bandas de frecuencia," 2022.
- [36] 5G Americas, "Enterprise Evolution with 5G Adoption 1," 2023.
- [37] UIT, "Mediciones de dispositivos de radiocomunicaciones de corto alcance Serie SM," vol. 2179, 2010.
- [38] H. Paz, *Sistemas de comunicaciones digitales*. Escuela Colombiana de Ingeniería, 2009.
- [39] ETSI, "TS 138 104 V16.10.0 - 5G; NR; Base Station (BS) radio transmission and reception (3GPP TS 38.104 version 16.10.0 Release 16)," vol. 0, 2022.
- [40] "Wireless Telecommunications | Federal Communications Commission." <https://www.fcc.gov/wireless-telecommunications> (accessed Jan. 16, 2023).
- [41] A. Ng-oma, *Radio-over-Fibre Technology for Broadband Wireless Communication Systems*, vol. 1, no. 2005. 2005. doi: 10.6100/IR592332.
- [42] ITU-R, "Requisitos básicos y objetivos de calidad de funcionamiento para sistemas de acceso inalámbrico fijo que utilizan tecnologías derivadas de las tecnologías móviles que ofrecen servicios de telefonía y de comunicaciones de datos Servicio fijo," vol. 4, 2011.
- [43] ITU-R, "Requisitos básicos y objetivos de calidad de funcionamiento para sistemas de acceso inalámbrico fijo que utilizan tecnologías derivadas de las tecnologías móviles que ofrecen servicios de telefonía y de comunicaciones de datos Servicio fijo," vol. 4, 2011.

-
- [44] I. Std, L. A. N. Man, S. Committee, and I. C. Society, “Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications,” vol. 2016, 1997.
- [45] ETSI, “ETSI EN 302 217-4-2 V1.4.1 2008 - E-band radiation pattern mask,” *Etsi*, vol. 1, pp. 1–36, 2008.
- [46] J. Guillory, “Radio over Fiber (RoF) for the future home area networks.” [Online]. Available: <https://theses.hal.science/tel-00786479>
- [47] V. J. Urick, J. X. Qiu, and F. Bucholtz, “Wide-band QAM-over-fiber using phase modulation and interferometric demodulation,” *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 16, no. 10, pp. 2374–2376, Oct. 2004, doi: 10.1109/LPT.2004.834551.
- [48] M. Kavehrad, “Fiber-optic Transmission of Microwave 64-QAM Signals.”
- [49] B. Stewart, K. Barlee, D. Atkinson, and L. Crockett, *Software Defined Radio Workflow Using MATLAB & Simulink and the RTL-SDR*. 2015.
- [50] J. Cepeda, “Diseño de un sistema transceptor para comunicaciones usando una multiplexación para 5G sobre Radio definido por software,” 2019.
- [51] J. Beas, G. Castanon, I. Aldaya, A. Aragon-Zavala, and G. Campuzano, “Millimeter-wave frequency radio over fiber systems: A survey,” *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 15, no. 4, pp. 1593–1619, 2013, doi: 10.1109/SURV.2013.013013.00135.
- [52] M. A. Ilgaz and B. Batagelj, “Preliminary idea for a converged fixed and mobile network infrastructure with 5G using Radio-over-Fiber technology and an Opto-Electronic Oscillator in the millimeter-wave range,” *International Conference on Transparent Optical Networks*, vol. 2016-Augus, pp. 1–4, 2016, doi: 10.1109/ICTON.2016.7550476.
- [53] M. Shin and P. Kumar, “1.25 Gbps optical data channel up-conversion in 20 GHz-band via a frequency-doubling optoelectronic oscillator for radio-over-fiber systems,” *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, pp. 63–66, 2007, doi: 10.1109/MWSYM.2007.380219.
- [54] B. Yang *et al.*, “Photonic microwave up-conversion of vector signals based on an optoelectronic oscillator,” *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 25, no. 18, pp. 1758–1761, 2013, doi: 10.1109/LPT.2013.2274808.

- [55] D. Zhu, S. Liu, and S. Pan, "Multichannel up-conversion based on polarization-modulated optoelectronic oscillator," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 26, no. 6, pp. 544–547, 2014, doi: 10.1109/LPT.2013.2296898.
- [56] Z. Tang and S. Pan, "A Q-band radio-over-fiber system for the distribution of uncompressed high-definition video signal," *Asia-Pacific Microwave Conference Proceedings, APMC*, vol. 1, pp. 5–7, 2016, doi: 10.1109/APMC.2015.7411672.
- [57] J.-Y. Lee, M.-S. Jeon, and J.-I. Song, "Remote Optical Frequency Up-Converter Based on Optoelectronic Oscillator," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 31, no. 1, pp. 50–53, 2019, doi: 10.1109/LPT.2018.2882546.
- [58] G. K. M. Hasanuzzaman, H. Shams, C. C. Renaud, J. Mitchell, A. J. Seeds, and S. Iezekiel, "Tunable THz Signal Generation and Radio-Over-Fiber Link Based on an Optoelectronic Oscillator-Driven Optical Frequency Comb," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 38, no. 19, pp. 5240–5247, 2020, doi: 10.1109/JLT.2019.2953070.
- [59] J. W. Li, Y. C. Yu, Z. Q. Yang, Y. C. Manie, and P. C. Peng, "A New Approach of RoF System Using Optoelectronic Oscillator and Discrete Mode Laser," *2021 IEEE International Conference on Consumer Electronics-Taiwan, ICCE-TW 2021*, pp. 2021–2022, 2021, doi: 10.1109/ICCE-TW52618.2021.9602946.
- [60] "Laser Diode Current / TEC Controller - ITC5000 Series." https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=925 (accessed Jul. 23, 2023).
- [61] "AQ6370D Telecom Optical Spectrum Analyzer 600 - 1700 nm | Yokogawa Test & Measurement Corporation." <https://tmi.yokogawa.com/solutions/products/optical-measuring-instruments/optical-spectrum-analyzer/aq6370d-optical-spectrum-analyzer/> (accessed Jul. 23, 2023).
- [62] "Thorlabs - PM100D Compact Power and Energy Meter Console, Digital 4" LCD." <https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=PM100D> (accessed Jul. 23, 2023).
- [63] "R&S@FSW Signal and spectrum analyzer | Rohde & Schwarz." https://www.rohde-schwarz.com/us/products/test-and-measurement/benchtop-analyzers/rs-fsw-signal-and-spectrum-analyzer_63493-11793.html (accessed Jul. 23, 2023).
- [64] "R&S@ZNA vector network analyzers | Rohde & Schwarz." https://www.rohde-schwarz.com/us/products/test-and-measurement/network-analyzers/rs-zna-vector-network-analyzers_63493-551810.html (accessed Jul. 23, 2023).

- [65] F. FITEL, “Datasheet: FRL15DCWx-A8x-xxxxx-x DWDM CW DFB Laser Module,” pp. 1–5, 2016.
- [66] ITU-T, “Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid,” *Series G.694.1*, pp. 1–16, 2020.
- [67] IxBlue, “MX-LN-20-PD-P-P-FA-FA - iXblue.” <https://www.ixblue.com/store/mx-ln-20-pd-p-p-fa-fa/> (accessed Apr. 15, 2023).
- [68] Ettus Research, “LP0965 Antenna,” *LP0965 Antenna*. <https://www.ettus.com/all-products/lp0965/>
- [69] E. Research, “USRP B205mini-i.” <https://www.ettus.com/all-products/usrp-b205mini-i/> (accessed Jun. 04, 2023).
- [70] Newport, “818-BB-35F Fiber-Optic Detector.” <https://www.newport.com/p/818-BB-35F> (accessed Jun. 04, 2023).
- [71] MiniCircuits, “Low Noise Amplifier, 500 - 8000 MHz, 50Ω | ZX60-83LN-S+ | Mini-Circuits.” <https://www.minicircuits.com/WebStore/dashboard.html?model=ZX60-83LN-S%2B> (accessed Jun. 04, 2023).
- [72] Thorlabs, “Laser Diode LP1550-SAD2,” pp. 0–2, 2015.
- [73] Newport, “High-Speed Receivers High-Speed Detectors Model 1414,” no. 408.
- [74] “Cavity Band Pass Filter, 5725 - 5875 MHz, 50Ω | ZVBP-5800-S+ | Mini-Circuits.” <https://www.minicircuits.com/WebStore/dashboard.html?model=ZVBP-5800-S%2B> (accessed Jun. 14, 2023).
- [75] IxBlue, “MXAN-LN series MXAN-LN-20”.
- [76] MiniCircuits, “Low Noise Amplifier, 500 - 8000 MHz, 50Ω | ZX60-83LN-S+ | Mini-Circuits.” <https://www.minicircuits.com/WebStore/dashboard.html?model=ZX60-83LN-S%2B> (accessed Jun. 03, 2023).
- [77] “20 dB Directional Coupler, 2000 - 18000 MHz, 50Ω | ZUDC20-02183-S+ | Mini-Circuits.” <https://www.minicircuits.com/WebStore/dashboard.html?model=ZUDC20-02183-S%2B> (accessed Jun. 29, 2023).
- [78] I. Ozdur, D. Mandridis, M. U. Piracha, M. Akbulut, N. Hoghooghi, and P. J. Delfyett, “Optical frequency stability measurement using an etalon-based optoelectronic

- oscillator,” *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 23, no. 4, pp. 263–265, 2011, doi: 10.1109/LPT.2010.2100375.
- [79] X. Zhu *et al.*, “A Frequency-Stable Optoelectronic Oscillator Based on Passive Phase Compensation,” *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 32, no. 10, pp. 612–615, May 2020, doi: 10.1109/LPT.2020.2987924.
- [80] Huanfa Peng, Naijing Liu, Yankun Li, Xiaopeng Xie, and Zhangyuan Chen, “Low Phase Noise and Highly Stable Optoelectronic Oscillator by Using Frequency-Multiplying Phase Locked Loop”.
- [81] Jian Dai, Yao Zeng, Xiaoyang Wang, Anni Liu, and Kun Xu, “Frequency compensation range amplification for the stabilized optoelectronic oscillator”.
- [82] J. F. Coronel Rico, “Injection Locked VCSEL Based Oscillator – ILVBO Juan Fernando Coronel Rico Universidad Nacional de Colombia Facultad de Ingeniería , Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica 2016 INJECTION LOCKED VCSEL BASED OSCILLATOR – ILVBO By Juan Fernando C,” 2016.